Zeitschrift: Bulletin de la Société Vaudoise des Sciences Naturelles

Herausgeber: Société Vaudoise des Sciences Naturelles

Band: 74 (1978-1979)

Heft: 355

Artikel: Terminologie et méthodes de la biostratigraphie moderne : commentaires critiques et propositions

Autor: Guex, Jean

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-277412

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 01.07.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Bulletin de la Société vaudoise des Sciences naturelles

N° 355 1979 Vol. 74, Fasc. 3

BULLETIN N° 234 des Laboratoires de Géologie, Minéralogie, Géophysique
et du Musée géologique de l'Université de Lausanne

Terminologie et méthodes de la biostratigraphie moderne: commentaires critiques et propositions[1)]

PAR

JEAN GUEX[2]

"'In biostratigraphy', says Holland (1978:86), 'all might be well if we say what we mean.' I suspect that the trouble with biostratigraphy is that we cannot say what we mean because the basic concept (the biozone) has never been properly defined and may indeed be indefinable; and there cannot be an acceptable science or philosophy of biostratigraphy unless the basic concept is defined."

JOHN T. TEMPLE (nov. 1978)

TABLE DES MATIÈRES

Résumé 170
Introduction 170

1re PARTIE: TERMINOLOGIE ET MÉTHODE 171

Terminologie biostratigraphique de l'ISSC 171
Méthode de corrélation et terminologie proposée 174
Comparaison avec la terminologie de l'ISSC 189

2e PARTIE: INTERVAL-ZONE ET DATUMS 191

3e PARTIE: PROBLÈMES ANNEXES 197

Approches statistiques des problèmes de corrélation 197
Remaniements, condensations, homéomorphies, migrations et lacunes 203
Longévité des espèces, distribution biogéographique et biochronozones 206
Hiérarchie des démarches analytiques 212

APPENDICES 214

BIBLIOGRAPHIE 215

---

[1] Travail effectué dans le cadre du Projet 2.024.078 du Fonds national suisse pour la recherche scientifique et publié dans le cadre du Projet IGCP N° 148. Publication subventionnée par la Fondation Herbette de l'Université de Lausanne et par le Fonds national suisse pour la recherche scientifique.

[2] Institut de Géologie, Palais de Rumine, 1005 Lausanne.

RÉSUMÉ

1re PARTIE. – La présente étude est une description de la démarche analytique qui est suivie pour aboutir à l'image d'une séquence d'espèces ou d'associations d'espèces (= «échelle biochronologique») mutuellement exclusives et dont le caractère «exclusif» est contrôlé uniquement par le facteur temps. Cette démarche est vraisemblablement voisine de celle qu'OPPEL (1856-1858) a adoptée empiriquement pour établir la première «zonation» du Jurassique dont les «unités» sont précisément décrites sous le nom de «Zones d'OPPEL». Selon cet auteur (*op. cit.*), les zones sont caractérisées par l'occurrence constante de certaines espèces homotaxiques et mutuellement exclusives sur de vastes surfaces géographiques. La réalité d'une «zone» se démontre en faisant abstraction de la roche qui contient les fossiles. L'analyse oppélienne conduit ainsi à la mise en évidence d'une séquence idéale dont les subdivisions (= «zones») ont approximativement le même âge dans toutes les régions où il est possible de les identifier.

OPPEL (*op. cit.*) n'a toutefois jamais décrit les détails de la voie qu'il suivait pour établir ses zones et une littérature assez abondante relative à ce problème en a résulté.

Parallèlement à la discussion du problème posé par la recherche de zones significatives au plan chronologique (= biochronozones), nous discutons également la terminologie biostratigraphique proposée récemment par l'ISSC (International Subcommission of Stratigraphic Classification; 1976).

2e PARTIE. – L'utilisation du nannoplancton calcaire pour faire des corrélations dans le Paléogène est particulièrement intéressante. En analysant les données actuellement disponibles sur la distribution des «espèces» (morphospecies) de ce groupe en Californie, on peut établir une échelle biochronologique satisfaisante.

Sur la base des corrélations impliquées par cette échelle, il est possible de montrer que les «espèces» apparaissent à des «moments» variables suivant les endroits. Le fait que les apparitions locales de ces espèces (= «datums» au sens usuel) sont hétérochrones implique qu'il est impossible d'utiliser ces «datums» pour définir des «Interval-Zones» (= intervalles séparant 2 «datums»). Pour illustrer cette impossibilité, on donne plusieurs exemples d'Interval-Zones formellement définies dans la littérature et dont les intervalles caractéristiques sont inversés dans certaines localités (ce qui prouve que de telles zones sont sans signification chronologique).

3e PARTIE. – Le problème posé par les corrélations des roches sédimentaires à l'aide de leur contenu fossile ne peut pas être résolu avec des techniques statistiques. Dans ce chapitre on discute d'abord les principales méthodes statistiques de traitement des informations biostratigraphiques. On décrit ensuite un test qui permet d'évaluer la qualité relative de l'enregistrement fossile d'un ensemble de profils stratigraphiques bien échantillonnés, en se basant sur la relation qui existe entre la longévité réelle des espèces et la «probabilité» pour qu'elles soient découvertes dans les différentes localités fossilifères.

INTRODUCTION

L'objet de cet article est double: dans une première partie on examinera d'un point de vue critique les définitions d'unités biostratigraphiques pro-

posées récemment par l'ISSC (International Subcommission of Stratigraphic Classification) dans le «International Stratigraphic Guide» (1976). On montrera d'abord pourquoi ces définitions sont, dans l'ensemble, difficilement applicables et pourquoi il peut être utile d'introduire un nouveau système de définitions.

Dans la deuxième partie on verra à quels genres d'erreurs peut conduire l'utilisation des concepts de «DATUM» et d'«Interval-Zone». Pour terminer (3e partie) on discutera plus en détail les difficultés inhérentes au problème posé par l'utilisation des fossiles dans les corrélations biostratigraphiques (s.l.).

Cet article sera, en quelque sorte, une tentative de réponse à la réflexion de TEMPLE (1978) citée en exergue (p. 169).

1re PARTIE: TERMINOLOGIE ET MÉTHODE

TERMINOLOGIE BIOSTRATIGRAPHIQUE DE L'ISSC

Il est nécessaire de commencer par reproduire ici les principales définitions biostratigraphiques de l'ISSC (1976 pp. 45 et suiv.).

> A) **Biostratigraphic Unit**—a body of rock strata unified by its fossil content or paleontological character and thus differentiated from adjacent strata. A biostratigraphic unit is present only within the limits of observed occurrence of the particular biostratigraphic feature on which it is based.
>
> B) **Biostratigraphic Zone (Biozone)**—a general term for any kind of biostratigraphic unit.

Les catégories de biozones retenues par l'ISSC sont les suivantes:

> 1) **Assemblage-Zone.** A biostratigraphic *assemblage-zone* is a body of strata whose content of fossils, or of fossils of a certain kind, taken in its entirety, constitutes a *natural* assemblage or association that distinguishes it in biostratigraphic character from adjacent strata.
>
> 2) **Range-Zones.** A biostratigraphic *range-zone* is the body of strata representing the total *range* of occurrences of any *selected* element of the total assemblage of fossil forms in a stratigraphic sequence. The word "range" implies extent in both horizontal and vertical directions.

L'ISSC (op. cit. pp. 48-61) discute en détail 4 sous-catégories de «Range-Zones»:

> 2-a. **Taxon-Range-Zone.** A *taxon-range-zone* is the body of strata representing the total range of occurrence (horizontal and vertical) of specimens of a particular taxon (species, genus, family, etc.).
>
> 2-b. **Concurrent-Range-Zone.** A *concurrent-range-zone* is defined as the concurrent or coincident parts of the range-zones of two or more specified taxons selected from among the total forms contained in a

sequence of strata. Definition of a concurrent-range-zone does not require that the range-zones of all taxons present concur or overlap, nor does it require that all those that do overlap be considered. The objective in defining the concurrent-range-zone is to select those overlapping range-zones that represent a biostratigraphic unit with optimum time significance and possibilities of geographic extension, although the zone is not in itself a chronostratigraphic unit.

Strictly speaking, all the taxons named in the definition of a concurrent-range-zone should be present before the zone can be recognized legitimately. In common practice, considerable tolerance is allowed, and the zone is recognized on the basis of the approximately joint occurrence of only a substantial proportion of the specified index taxons (cf. Oppel-zone, Section 6.D.3, p. 57).

The principle of the concurrent-range-zone has long been used in time-correlation. The use of two or more taxons whose range-zones overlap reinforces the time significance of an individual taxon-range.

The term concurrent-range-zone is expressive of the meaning of the zone, although difficult to translate from English into some other languages. Concurrent-range-zones have been referred to as *overlap zones or range-overlap-zones.*

2-c. **Oppel-Zone.** The Oppel-zone, named after the German stratigrapher, Albert Oppel (1831-1865), whose usage it roughly follows, largely embodies the concept of the concurrent-range-zone but relaxes its strict interpretation sufficiently to allow supplementary use of biostratigraphic criteria other than range-concurrence that are thought to be useful in demonstrating time-equivalence. The Oppel-zone is a more subjective, more loosely defined, and more easily applied biozone than the concurrent-range-zone. The term Oppel-zone has not been widely used, but the concept corresponds to a widespread practice in biostratigraphic zonation.

The Oppel-zone may be defined as a zone characterized by an association or aggregation of *selected* taxons of restricted and largely concurrent range, chosen as indicative of approximate contemporaneity. Not all of the taxons considered diagnostic need be present at any one place for the zone to be legitimately identified. The lower part of the zone is commonly marked largely by first appearance and its upper part by last appearance of certain taxons. The body of the zone is marked largely by concurrences of the diagnostic taxons.

The Oppel-zone is difficult to define empirically because judgment may vary as to how many and which of the selected diagnostic taxons need be present to identify the zone.

2-d. **Lineage-Zone (Phylozone).** A lineage-zone is a type of range-zone consisting of the body of strata containing specimens representing a segment of an evolutionary or developmental line or trend, defined above and below by changes in features of the line or trend. This type of zone has also been termed an *evolutionary zone,* a *morphogenetic zone,* a *phylogenetic zone,* or a *phylozone.*

Les deux dernières catégories de biozones définies par l'ISSC sont:

> 3) **Acme-Zones.** An *acme-zone* is a body of strata representing the acme or maximum development–usually maximum abundance or frequency of occurrence–of some species, genus, or other taxon, but not its total range.
>
> A problem is presented in defining what constitutes a "maximum of development", and thus in defining the boundaries of an acme-zone. For instance, "maximum development" may refer to abundance of specimens of a taxon or it may refer to number of species in a genus. Some workers consider acme-zones valuable indicators of chronostratigraphic position.
>
> 4) **Interval-Zone (Interbiohorizon Zone)**–the stratigraphic *interval* between two biohorizons.
>
> **Biohorizons** = *surfaces* of biostratigraphic change or of distinctive biostratigraphic character; preeminently valuable for correlation (not necessarily time-correlation); commonly used as a biozone boundary, though often recognized as horizons *within* biozones. In theory, a biohorizon is strictly a surface or interface; in practice, the term may refer to a thin but biostratigraphically distinctive bed. Features on which biohorizons are commonly based include "first appearances", "last occurrences", distinctive occurrences, changes in frequency and abundance, evolutionary changes, and changes in the character of individual taxons (e. g., changes in direction of coiling in foraminifers, or in number of septa in corals).

Remarque: Dans la littérature actuelle c'est le terme de «DATUM» (= biohorizon) qui est le plus fréquemment employé et c'est lui que nous utiliserons par la suite.

Discussion

Il ressort de ces définitions que:

1) L'ISSC considère toutes les catégories de «biozones» comme des corps de roches. Ces biozones sont caractérisées par certaines particularités qui devraient permettre de les distinguer entre elles.

2) L'ISSC ne suggère pas le moindre critère qui pourrait orienter le lecteur du «Guide» vers la compréhension de ce qui est significatif d'une contemporanéité approximative des niveaux sédimentaires lorsque ceux-ci sont étudiés du point de vue de leur contenu fossile. Ce problème est totalement laissé à l'appréciation intuitive du stratigraphe:

- "range-concurrence that are thought to be useful in demonstrating time-equivalencs"...
- "association of selected taxons (...) chosen (sic) as indicative of approximate contemporaneity"...
- "a problem is presented in defining what constitutes a maximum of development" etc...

Ces constatations amènent deux remarques qui s'appliquent également au «Guide to stratigraphical procedure» anglais publié récemment par HOLLAND & al. (1978):

1) Vouloir définir les biozones comme des corps de roches implique qu'il n'y aurait pas de différence fondamentale entre les corrélations établies à l'aide des fossiles et les corrélations purement lithostratigraphiques. C'est donc une négation implicite du fait que les «zones» classiques (comme celle d'OPPEL par exemple) sont des subdivisions d'échelles chronologiques.

2) Les critères permettant d'établir pourquoi la présence d'une espèce (ou d'un assemblage d'espèces) dans un niveau peut être considérée comme caractéristique de l'âge relatif de ce niveau doivent être précisés.

Nous allons donc commencer par proposer un certain nombre de définitions.

MÉTHODE DE CORRÉLATION ET TERMINOLOGIE PROPOSÉE

I) Biostratigraphie et biochronologie

Avant de discuter les problèmes propres à l'utilisation des fossiles dans la datation des roches sédimentaires, il faut faire une distinction claire entre «biostratigraphie» et «biochronologie». Le terme de biostratigraphie s'applique d'une manière générale à tout ce qui touche à l'étude du contenu fossile des roches sédimentaires: inventaire paléontologique, étude des biofaciès etc. Le terme de biochronologie décrit uniquement l'opération qui consiste à chercher, au sein d'un assemblage fossile, les taxons qui sont caractéristiques de l'âge approximatif du dépôt sédimentaire contenant cet assemblage. La biochronologie est donc un domaine d'étude distinct de la biostratigraphie.

II) Associations unitaires

Il est nécessaire de rappeler ici que deux espèces sont dites «compatibles» si elles ont été trouvées ensemble dans un niveau sédimentaire au moins. L'association unitaire (abrégée AU) est définie comme un ensemble maximum d'espèces compatibles: elle correspond donc à un intervalle de coexistence d'espèces dont la «durée» est minimum. C'est un intervalle de temps dont on ne connaît ni la durée «absolue» (= exprimée en années), ni la position par rapport aux autres intervalles de coexistence dont la réalité peut être démontrée. Le problème de la mise en évidence des associations unitaires significatives au plan temporel constitue donc l'un des objets essentiels de l'analyse biochronologique.

Il découle de la définition ci-dessus (détails: cf. GUEX, 1977) qu'une association unitaire est unique. Il est impossible de lui soustraire l'une des

espèces qu'elle contient: elle ne constituerait alors plus un ensemble maximum. Il est également impossible d'y ajouter une espèce supplémentaire car celle-ci serait alors incompatible avec au moins l'une des espèces appartenant à cette association unitaire. Une séquence d'associations unitaires est engendrée par les relations d'association et d'exclusion entre toutes les espèces. Une telle séquence peut être établie «manuellement» (GUEX, 1977 et 1978 b) ou avec l'aide d'un ordinateur (DAVAUD, 1978): elle sert de cadre préliminaire à la construction de l'échelle biochronologique (p. 179).

III) Identification des associations unitaires dans les profils stratigraphiques

1) Au sein d'une suite ordonnée d'associations unitaires (i.e. en faisant abstraction de la première et de la dernière AU), une association unitaire particulière est engendrée par l'exclusion mutuelle de 3 espèces (ou taxons) au moins (fig. 1):

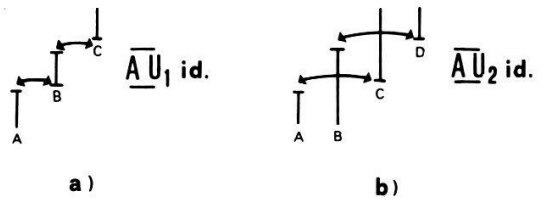


Fig. 1: a) Distribution verticale de 3 espèces (A, B et C) mutuellement exclusives.
AU_1 = association unitaire engendrée et caractérisée par l'espèce B
AU_1 est identifiée (id.) dans tous les profils stratigraphiques où l'on trouve B.
b) Distribution verticale de 4 espèces (A, B, C et D)
AU_2 = association unitaire engendrée et caractérisée par le couple $B \cap C$, exclusif de A et de D.
AU_2 est identifiée (id.) dans tous les profils stratigraphiques où l'on trouve $B \cap C$.

Dans la figure 1-a on montre une association unitaire (AU_1) caractérisée par une espèce unique (B). Cette AU_1 est engendrée par l'exclusion mutuelle de B avec A et C. Dans la figure 1-b on montre une association unitaire (AU_2) caractérisée par un couple d'espèces ($B \cap C$). AU_2 est engendrée par l'exclusion mutuelle de $B \cap C$ avec A et D. Dans le premier cas on dira que AU_1 est «identifiée» dans tous les profils stratigraphiques où l'on trouve l'espèce B. On dira que AU_1 est «potentiellement identifiable» dans tous les profils où il existe un intervalle stratigraphique séparant la disparition locale d'une espèce appartenant à une association unitaire quelconque précédant AU_1 (dans le tableau des associations unitaires) de l'apparition locale d'une espèce appartenant à une association unitaire quelconque suivant AU_1 (dans le tableau des associations unitaires), même si cet intervalle stratigraphique a une épaisseur nulle (fig. 2-a). →

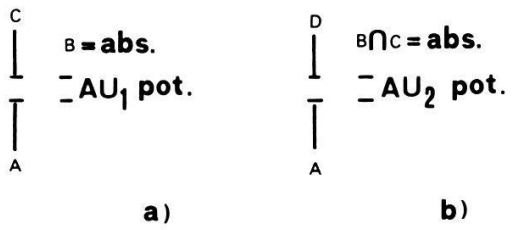


Fig. 2: a) Si l'espèce B, caractéristique de AU_1 (cf. fig. 1-a) est absente (B = abs.) dans un profil stratigraphique où les associations unitaires engendrées par les espèces A et C sont identifiées, on dira que AU_1 est «potentiellement identifiable» (AU_1 = pot. id.) dans ce profil.
b) Si le couple d'espèces $B \cap C$, caractéristique de AU_2 (fig. 1-b) est absent ($B \cap C$ = abs.) dans un profil stratigraphique où les associations unitaires engendrées par les espèces A et D sont identifiées, on dira que AU_2 est potentiellement identifiable (AU_2 = pot. id.) dans ce profil.

Dans le deuxième cas on dira que AU_2 est identifiée dans tous les profils où l'on trouve le couple $B \cap C$. On dira que AU_2 est potentiellement identifiable dans tous les profils stratigraphiques où il existe un intervalle stratigraphique séparant la disparition locale d'une espèce appartenant à une association unitaire quelconque précédant AU_2 (dans le tableau des association unitaires), de l'apparition locale d'une espèce appartenant à une association unitaire quelconque suivant AU_2 (dans le tableau des associations unitaires), même si cet intervalle stratigraphique a une épaisseur nulle (fig. 2-b).

2) Une association unitaire AU_x peut être caractérisée par un ensemble d'espèces, par un ensemble de couples d'espèces ou par une combinaison d'ensembles d'espèces et de couples d'espèces. La mise en évidence de l'intervalle de coexistence correspondant à AU_x découle de l'analyse des relations d'association et d'exclusion entre toutes les espèces dans tous les profils stratigraphiques étudiables: il est donc peu probable que l'assemblage caractéristique d'une telle association (= assemblage «x») soit observable localement dans son intégralité. Imaginons la situation où AU_x est caractérisée par 45 couples d'espèces (fig. 3-a) représentant les différentes

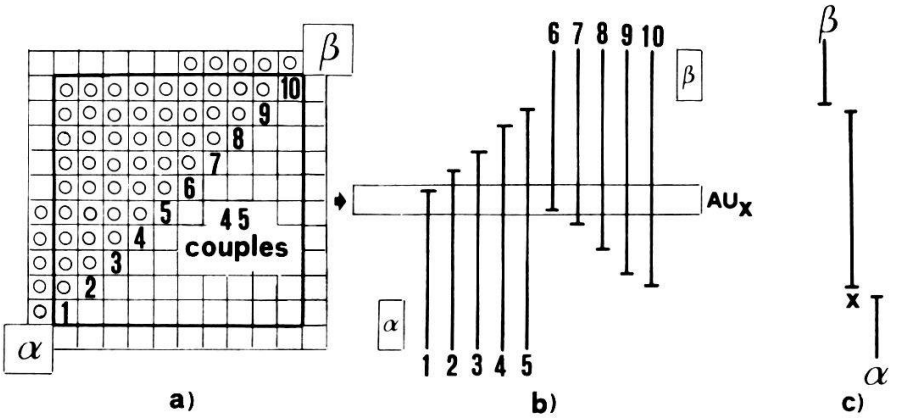


Fig. 3: 1 à 10 = 10 espèces
α et β = espèces (ou assemblages d'espèces) caractéristiques de 2 associations unitaires qui encadrent AU_x
AU_x = association unitaire caractérisée par 45 couples d'espèces
x = assemblage caractéristique de AU_x

combinaisons d'associations possibles ($= \frac{n(n-1)}{2}$) entre 10 espèces (1 à 10: fig. 3-b).

Dans le «pire des cas», AU_x peut avoir été mise en évidence sur la base des associations locales observées dans 45 profils stratigraphiques différents (i. e. un couple par localité). On sera ainsi obligé d'identifier localement AU_x à l'aide d'une fraction de son assemblage caractéristique total (p. ex. $1 \cap 7$ ou $1 \cap 8$ ou $2 \cap 9$ ou $3 \cap 10$ etc.).

Il faut noter en passant que la durée correspondant à l'intervalle de coexistence d'un couple indiciel isolé est plus grande que (ou égale à) celle qui correspond à l'intervalle de coexistence de l'assemblage indiciel (= ensembles des couples indiciels) complet (fig. 3-c).

D'une manière générale on dira donc qu'une association unitaire AU_x caractérisée par un assemblage «x» (fig. 3-c) est «identifiée» dans tous les profils stratigraphiques où l'on trouve une partie de «x» (i. e.: espèces ou couples d'espèces). On dira que AU_x est «potentiellement identifiable» dans tous les profils stratigraphiques où il existe un intervalle séparant la disparition locale d'une espèce appartenant à une association unitaire quelconque précédant AU_x (dans le tableau des associations unitaires) de l'apparition locale d'une espèce appartenant à une association unitaire quelconque suivant AU_x (dans le tableau des associations unitaires), même si cet intervalle a une épaisseur nulle.

3) Une association unitaire potentiellement identifiable peut fort bien rester non identifiée dans un certain nombre de localités pour deux raisons: a) les niveaux sédimentaires qui pourraient l'avoir enregistrée ne sont pas fossilifères; b) ces localités comportent des lacunes (cf. p. 206).

IV) Principe de Reproductibilité

On a vu dans une autre étude (Guex, 1978 a, fig. 1–2) comment, au sein d'une suite ordonnée d'associations unitaires (i.e. dans un «tableau des associations unitaires»), certaines associations se suivaient dans un ordre correspondant à leur succession chronologique réelle alors que d'autres pouvaient se trouver dans un ordre contraire à celle-ci. Il est évidemment essentiel de mettre en évidence les associations qui sont caractérisées par des assemblages mutuellement exclusifs pour des raisons chronologiques et de les distinguer des autres. Pour cela on peut faire remarquer deux choses:

a) Il découle de la définition des associations unitaires (discussion détaillée: Guex, 1977) que les espèces ou les couples d'espèces qui les caractérisent sont obligatoirement homotaxiques (=observés dans le même ordre de succession) dans tous les profils stratigraphiques.

b) Si deux associations unitaires sont identifiées dans tous les profils où elles sont potentiellement identifiables, il est très probable que les exclu-

sions mutuelles qui les engendrent soient contrôlées uniquement par le facteur temps (et non pas par des facteurs documentaires s.l. = échantillonnage insuffisant, confinement écologique, etc.). En d'autres termes l'ordre dans lequel les espèces caractéristiques de ces associations unitaires se succèdent correspond très probablement à une séquence chronologique réelle.

On dira donc que les associations qui sont identifiées dans tous les profils où elles sont potentiellement identifiables satisfont le Principe de Reproductibilité. Les espèces (ou les couples d'espèces) caractéristiques de telles associations unitaires seront qualifiées d'«indicielles».

Exemple: Imaginons une séquence de 10 associations unitaires (1-10) engendrées par les relations d'association et d'exclusion de 11 espèces (A à K) dans 7 profils stratigraphiques (I à VII) géographiquement éloignés (fig. 4-a). La figure 4-b montre la séquence de ces associations.

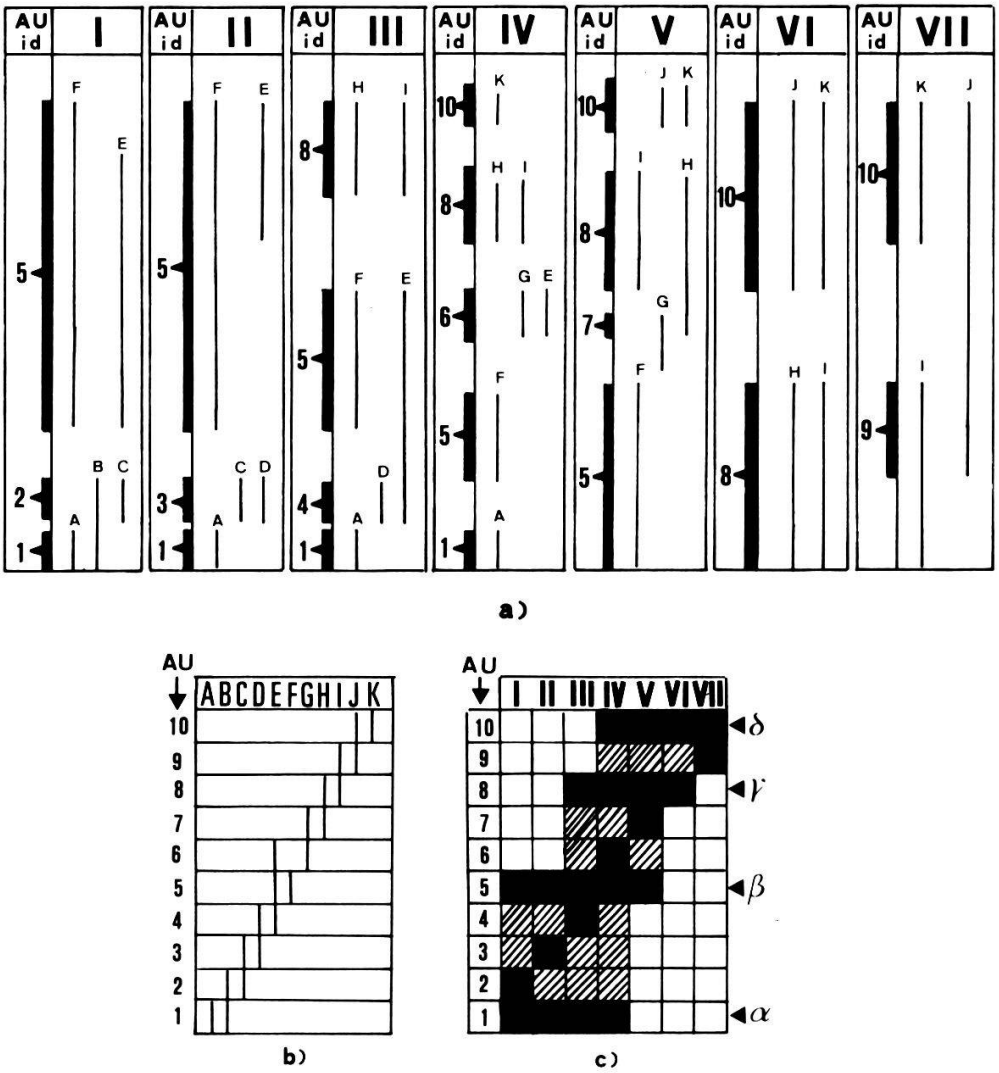


Fig. 4: a) Tableau montrant la distribution verticale locale de 11 espèces (A à K) dans 7 profils stratigraphiques (I à VII)
N. B.: ces profils ne contiennent pas nécessairement des espèces de même âge.
b) Tableau des associations unitaires (AU 1-10) engendrées par les relations d'association et d'exclusion entre les espèces A à K (fig. 4-a).
c) Tableau montrant dans quels profils (I à VII) les associations unitaires 1 à 10 sont identifiées et potentiellement identifiables.

Les blocs noirs de la figure 4-c montrent dans quels profils ces associations sont identifiées et les traits obliques montrent dans quels profils elles sont potentiellement identifiables. Ces diagrammes doivent être interprétés ainsi:

a) L'espèce A (caractéristique de l'association 1) se trouve dans les profils I à IV. Les couples d'espèces $B \cap C$, $C \cap D$ et $D \cap E$ (caractéristiques des associations unitaires 2, 3 et 4) ne se trouvent respectivement que dans un profil. L'espèce F (association 5) se trouve dans les profils I à V. Cela veut dire que les associations unitaires 2, 3 et 4 pourraient éventuellement être identifiées dans les profils I à IV si elles étaient engendrées par des exclusions d'origine chronologique. Le fait qu'elles ne sont pas identifiées par ces profils implique d'une part qu'elles sont inutiles pour corréler les profils entre eux et d'autre part que les exclusions qui les engendrent peuvent fort bien être fortuites (documentaires s.l.) etc.

b) La figure 4-c permet ainsi de visualiser le fait que seules les associations unitaires 1, 5, 8 et 10 satisfont le principe de reproductibilité et peuvent ainsi servir de point de départ à la définition de «biochronozones». Dans cet exemple on voit qu'il existe 2 «zones» complètement définies (*bêta* et *gamma*), caractérisées par F et $H \cap I$. Les relations entre l'espèce A (caractéristique de la première association unitaire) et des espèces plus anciennes ne sont pas connues. De même les relations entre l'espèce K et des espèces plus récentes ne sont pas connues non plus: l'utilisation de ces espèces pour établir des «zones» (*alpha* et *delta*) conduira donc à des définitions incomplètes puisque la base de *alpha* et le sommet de *delta* ne pourront pas être définis.

c) Dans le cadre d'un problème restreint (par exemple la zonation d'un étage à l'aide des ammonites), la qualité de la reproductibilité relative observée pour une association unitaire donnée peut être exprimée par le coefficient suivant:

$$R = \frac{N_{id.}}{N_{pot.}} \cdot N_{id.}$$

où $N_{id.}$ = nombre de profils stratigraphiques dans lesquels une association unitaire est identifiable

et $N_{pot.}$ = nombre de profils dans lesquels cette association est potentiellement identifiable.

N. B.: Une association unitaire «identifiée» dans un profil stratigraphique doit nécessairement être considérée comme «potentiellement identifiable» dans ce même profil.

V) Biochronozones et échelle biochronologique

Définitions et conditions de validité:

1) Une biochronozone est une subdivision fine de l'échelle biochronologique. Elle correspond à la durée d'existence de son espèce indicielle ou

à la durée de coexistence de son assemblage indiciel (= ensembles des espèces et des couples d'espèces caractéristiques d'une association unitaire identifiable de manière reproductible). Ses limites doivent être définies dans un ou deux stratotypes: un seul si les limites inférieures et supérieures sont représentées de manière adéquate dans une localité unique; deux dans le cas contraire (cf. p. 182: biochronozones et stratotypes).

2) L'échelle de temps («relative») établie à l'aide du contenu fossile des roches sédimentaires est une échelle «biochronologique». Cette échelle a les particularités suivantes:

a) ses subdivisions sont discrètes. Elles ne s'expriment pas en années mais en termes d'intervalles d'existence (ou de coexistence) d'espèces fossiles. Ces intervalles sont situés les uns par rapport aux autres en termes d'antériorité et de postériorité.

b) elle peut être comparée à un «calendrier» dans lequel les biochronozones sont des subdivisions correspondant à des intervalles successifs disjoints dont les limites sont floues.

c) elle est en principe indéfiniment perfectible (Gabilly, 1967; Tozer, 1967), mais, dans un état de connaissance donné, elle rend un compte exact de toutes les observations biostratigraphiques locales disponibles dans la littérature.

d) par nécessité, une échelle biochronologique établie sur la base des relations d'association et d'exclusion d'un groupe fossile particulier (ordre ou sous-classe par exemple) n'est applicable qu'au domaine d'existence biogéographique du groupe utilisé. Il est évidemment indispensable d'établir des échelles biochronologiques distinctes pour des milieux écologiques très différents (à la limite: marin *versus* continental...). La nomenclature des échelles parallèles est discutée dans les pages relatives à la «stratigraphie intégrée» et aux «zones standard» (p. 186 et suiv.).

3) Les notions de *«stabilité»* d'une échelle biochronologique et celle de *«masse critique d'information»* nécessaire pour l'établir sont naturellement sous-jacentes à celle du principe de reproductibilité. On dira qu'une échelle biochronologique est «stable» à partir du moment où des informations biostratigraphiques nouvelles ne contredisent plus des déductions antérieures sur les relations d'âge entre des faunes. On dira que la «masse critique d'informations» biostratigraphiques est atteinte lorsque les informations nouvelles qui s'accumulent permettent d'affirmer qu'une échelle est stable. Le fait qu'une échelle biochronologique soit stable n'implique pas qu'elle n'est plus indéfiniment perfectible: dans une échelle stable, les associations unitaires significatives au plan temporel vont subsister (i.e. rester invariantes par rapport à leur succession chronologique déduite). Le «perfectionnement» de l'échelle s'opère d'une part sur les limites entre les biochronozones (adjonction d'associations unitaires significatives au plan temporel dans leurs intervalles de séparation) et d'autre part sur les biochronozones elles-mêmes (par subdivision en plusieurs biochronozones

nouvelles). A titre d'exemple on peut à nouveau prendre les zones d'OPPEL: l'échelle biochronologique établie par OPPEL est stable depuis plus de cent ans, mais de nombreuses biochronozones nouvelles ont été ajoutées à la séquence qu'il a établie.

4) Il découle de ces définitions que les critères classiques de qualités requises pour les «fossiles caractéristiques» (espèces ou assemblages indiciels = «marqueurs stratigraphiques») sont automatiquement satisfaits: seuls les groupes qui montrent une large distribution biogéographique et qui sont les moins sensibles aux variations écologiques sont potentiellement générateurs de biochronozones.

Remarque: L'ISSC considère les zones d'OPPEL comme des corps de roches. Or les zones introduites par cet éminent précurseur possèdent toutes les caractéristiques des biochronozones définies ici.

Nous devons donc justifier notre opinion qui est en contradiction avec celle de l'ISSC. Pour cela commençons par donner la parole à OPPEL (1856, p. 3):

> «Es wurden immer bloss ganze Schichtengruppen mit einander parallelisirt, nicht aber gezeigt, dass ein jeglicher Horizont, der an dem einen Orte durch eine Anzahl für ihn constanter Species markirt wird, auch in der entferntesten Gegend mit derselben Sicherheit wieder zu finden sei. Diese Aufgabe ist zwar eine schwierige, aber nur durch ihre Erfüllung kann eine genaue Vergleichung ganzer Systeme gesichert werden. Es wird dabei nöthig gemacht, mit Hintansetzung der mineralogischen Beschaffenheit der Schichten, die verticale Verbreitung jeder einzelnen Species an den verschiedensten Orten zu erforschen, hernach diejenigen Zonen hervorzuheben, welche durch stätes und alleiniges Auftreten gewisser Arten sich von den angrenzenden als bestimmte Horizonte absondern. Man erhält dadurch ein ideales Profil, dessen Glieder gleichen Alters in den verschiedenen Gegenden immer wieder durch dieselben Arten charakterisirt werden.»

De cela on retiendra les points essentiels suivants:

a) l'existence d'une «zone» se démontre en faisant abstraction de la nature pétrographique des strates

b) la «zone» est caractérisée par l'occurrence constante et exclusive de certaines espèces (selon notre terminologie ce sont donc des espèces caractéristiques d'associations unitaires qui satisfont le principe de reproductibilité)

c) de l'analyse oppelienne résulte l'image d'une séquence idéale dont les subdivisions ont le «même» âge dans toutes les régions où on les trouve (N. B.: OPPEL était parfaitement conscient de l'incertitude qu'il convient d'attacher au terme «même âge»).

En d'autres termes OPPEL concevait ses zones comme des subdivisions d'une échelle chronologique...

Il est toutefois clair que ceux qui assimilent la recherche des «Oppel-Zones» à un pur problème de classification des roches sédimentaires sont naturellement obligés de considérer ces zones comme des corps de roche et non pas comme des subdivisions d'une échelle chronologique... Or, ce point de vue est philosophiquement insatisfaisant puisque la démarche qui conduit à la mise en évidence de séquences d'Oppel-Zones s'opère en faisant abstraction de la roche qui contient les fossiles.

Pour montrer que ce problème suscite encore bien des polémiques, il vaut la peine de citer HANCOCK (1977, p. 21):

> "Some German stratigraphers (e. g. SCHINDEWOLF 1950, ...) have even interpreted a zone as a time term to designate an interval during which was deposited the sediment that contains certain index fossils. Such mystical inexactitude has dissatisfied twentieth-century American pragmatic stratigraphers."

En 1956, ARKELL (p. 5) proposait de son côté une solution pragmatique à ces problèmes mystiques:

> "British geologists have always envisaged a zone as a bed or stratum, a tangible object accessible to the hammer, though differing lithologically from place to place. Consequently some have thought it necessary to construct a parallel terminology to express the time units to which the various kinds of zones correspond. The need to keep time and rock distinct in our thoughts is obvious, and to the extent that this elaborate terminology has led to clarification of thought it has served a useful purpose. But beyond that it is unnecessary. No one uses it, nor ever will.
>
> That Oppel himself fully appreciated the time element cannot be doubted (Schindewolf, 1950). The fact that he nowhere defined a zone, nor made it clear whether his zones were strata or time intervals, may be taken to mean that he visualized zones from both aspects at once. The argument that a zone must be one or the other is sterile. A zone is much more than a mere bed or stratum, or a formation, because it is an abstraction and a generalization: it is in theory *any* bed, stratum, or formation deposited in any part of the world during the period in which the index fossils lived."

Quoi qu'il en soit, la durée d'existence respective de toutes les espèces est limitée dans le temps. Il n'est donc pas absurde de dire que les relations d'association et d'exclusion entre chaque groupe fossile (espèces ou genres d'ammonites, de trilobites, de nannoplancton, etc.) engendrent des «échelles de temps», même si ces échelles n'ont pas la précision d'une montre suisse.

VI) Biochronozone et stratotype

Une condition de validité impliquée par les définitions données plus haut est la suivante:

Un stratotype biochronologique doit être choisi de manière à contenir la limite entre deux biochronozones. En d'autres termes il doit matérialiser localement le contrôle superpositionnel entre ces 2 biochronozones. La notion de limite entre 2 unités biochronologiques ne signifie cependant rien d'absolu car, par définition, une biochronozone n'a de sens que si l'on connaît les relations des espèces qui la caractérisent avec celles qui caractérisent les biochronozones qui l'encadrent. Cette nécessité a été fort bien exprimée par MILLER (1965, p. 125):

> "The criterion for the validity of a zone must be its regular and universal position above a precedent zone and below a following one in a "sandwich" pattern..."

La limite entre 2 biochronozones A et B (A étant plus ancienne que B) est un «intervalle de séparation» (GUEX, 1977): c'est un intervalle situé entre la disparition de l'espèce indicielle d'une biochronozone (A) qui disparaît le plus tardivement et l'apparition de l'espèce indicielle de la biochronozone suivante (B) qui apparaît le plus précocement (fig. 5).

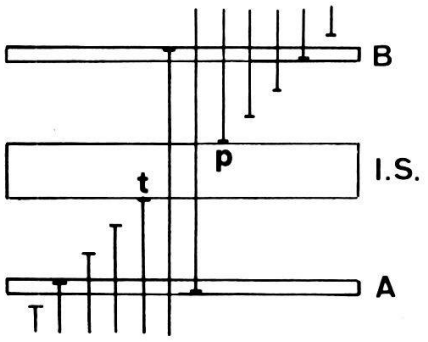


Fig. 5: A et B = biochronozones successives
IS = intervalle de séparation entre A et B
t = espèce existant dans A (mais pas dans B) qui disparaît le plus tardivement
p = espèce existant dans B (mais pas dans A) qui apparaît le plus précocement.

Une deuxième condition n'est pas impérative et relève plutôt du «critère de qualité» (laissé à l'appréciation du stratigraphe): on sait que les associations locales (observées dans les différentes localités) qui servent à établir les associations unitaires (déduites) sont à priori géographiquement dispersées. En d'autres termes les associations locales sont des sous-ensembles des assemblages indiciels (cf. p. 178) et théoriquement, aucune localité n'est supposée contenir l'assemblage caractéristique complet d'une biochronozone particulière.

On choisira donc si possible le stratotype de manière qu'il contienne un assemblage indiciel le plus complet possible pour l'une des biochronozones au moins.

Un problème apparaît néanmoins si l'on veut choisir un niveau-type qui serait censé marquer la limite entre 2 biochronozones dans le strato-

type: le «Golden Spike» des auteurs anglo-saxons. Considérons un stratotype sub-idéal dans lequel deux biochronozones successives seraient représentées par deux niveaux fossilifères («o» et «n») contenant des assemblages indiciels complets A et B (fig. 6).

En l'absence d'autres critères, il est évident que la «limite» entre ces deux biochronozones peut se situer n'importe où au-dessus du niveau «o» et au-dessous du niveau «n».

Cette indétermination est de quelque importance si l'on veut «fixer» un lien matériel entre la biochronozone et l'intervalle de temps «absolu» qu'elle recouvre dans la localité-type. En théorie, cet intervalle (T_y-T_x de la fig. 6) sépare le dépôt d'un niveau-type «x» dans le stratotype x et le dépôt d'un niveau-type «y» dans le stratotype Y (les stratotypes X et Y pouvant être géographiquement confondus). Pour qu'il y ait la meilleure correspondance possible entre la biochronozone et cet intervalle de temps «absolu» (= exprimé en années), les niveaux-types x et y (fig. 6) devraient donc se situer dans les intervalles de séparation (fig. 5) entre les biochronozones A/B et B/C (fig. 6).

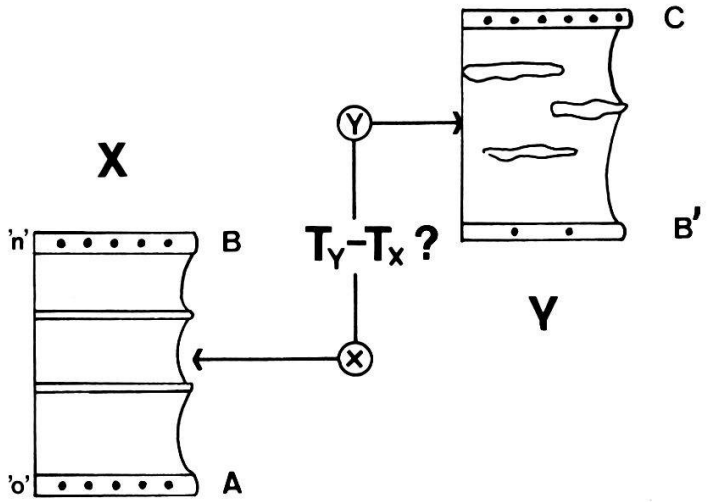


Fig. 6: X = stratotype contenant la limite entre les biochronozones A et B
Y = stratotype contenant la limite entre les biochronozones B et C
A = assemblage indiciel complet de la biochronozone A
B = assemblage indiciel complet de la biochronozone B
C = assemblage indiciel complet de la biochronozone C
B' = assemblage indiciel partiel de la biochronozone B
«o» = niveau contenant A
«n» = niveau contenant B
T_y–T_x = intervalle de temps «absolu» séparant le dépôt d'un niveau x de X et le dépôt d'un niveau y de Y.

Cela est par essence impossible car on ne possède aucun critère direct ou indirect qui permette de dire où ces niveaux se situent exactement dans les profils stratigraphiques. En d'autres termes il ne peut théoriquement pas exister de correspondance temporelle précise entre la biochronozone

et l'intervalle de temps «absolu» qu'elle recouvre, y compris dans le stratotype (cf. ci-dessous)... Il est donc faux de vouloir à tout prix assujettir la limite entre 2 biochronozones à un «Golden Spike» qui peut fort bien se situer en dehors de leur intervalle de séparation «vrai». Il suffit que cette limite se trouve indiscutablement dans le stratotype: cela n'est possible que si celui-ci contient à la fois les 2 zones pour lesquelles on veut matérialiser localement le contrôle superpositionnel. A l'heure actuelle le problème de la correspondance exacte entre la biochronozone et l'intervalle de temps «absolu» qui lui correspond est purement académique (au sujet de problèmes analogues, SCHINDEWOLF, 1970, p. 27, parlait de «Exaktheits-Fanatismus»...): on ne possède pas de technique de mesure qui permette de corréler des surfaces isochrones sur une vaste échelle géographique (cf. remarque 1° ci-dessous, et JELETZKY, 1978, pour la magnétostratigraphie). Notons d'ailleurs que la plantation d'un «Golden Spike» destiné à fixer localement la position d'une surface isochrone est utopique: si le «clou» est planté dans une lacune (ou dans un niveau condensé) il ne définit pas une surface mais un volume: i. e. un intervalle d'incertitude en tous points comparable à celui laissé par l'intervalle de séparation entre 2 biochronozones dans leur stratotype... Le «Golden Spike» est donc superflu.

Notons pour terminer que les erreurs (cf. 2e partie) qui se commettent aujourd'hui dans les corrélations biostratigraphiques trouvent leur origine dans la pratique «officielle» qui veut que les «zones» soient définies par un «Golden Spike» et par leur base uniquement: il est évident que si cette pratique est considérée comme juste, les biostratigraphes non avertis ne vont pas chercher à découvrir des ensembles d'espèces mutuellement exclusifs et observés sur de vastes surfaces géographiques en séquence constante (comme le préconisait OPPEL); ils se contenteront de décréter (sans le démontrer) que des «événements» (p. ex. des «datums»: cf. p. 191) sont significatifs au plan temporel et leurs corrélations seront insatisfaisantes (cf. 2e partie).

Remarques: 1°) La «chronozone» est définie officiellement comme l'ensemble des roches qui se sont formées pendant l'intervalle de temps «absolu» correspondant à une «biozone». Ce concept n'est utile que dans la mesure où il rappelle aux biostratigraphes que les corrélations biochronologiques sont une approximation de corrélations temporelles.

2°) On pourrait nous objecter que le stratotype de biochronozone n'est théoriquement pas indispensable (cf. SCHINDEWOLF, 1970) puisque celle-ci est définie par son assemblage indiciel et non pas par le corps de roche dans lequel on peut identifier sa présence. Dans la pratique c'est cependant une nécessité: si une zone est invalidée, il faut pouvoir raccorder l'intervalle stratigraphique qu'elle prétend recouvrir à un nouvel intervalle correctement défini. Cela ne peut être fait de manière rigoureuse que lorsque la zone controversée possède un stratotype.

VII) Dénomination des biochronozones

En principe il faut attribuer un nom à une biochronozone. Comme une biochronozone peut être caractérisée par une espèce, par un couple d'espèces ou par une combinaison d'ensemble d'espèces et d'ensemble de couples d'espèces (cf. p. 176), on choisira le nom de l'une des espèces indicielles (ou ceux des espèces appartenant à l'un des couples indiciels) pour la dénommer. Le choix se portera naturellement sur l'espèce (ou sur le couple d'espèces) qui est à la fois le plus fréquent et qui montre la distribution biogéographique la plus vaste possible.

Dans le cadre d'une étude biostratigraphique détaillée, effectuée sur une grande échelle géographique, mais recouvrant un intervalle de temps restreint (p. ex. la zonation du Paléogène discutée plus loin, p. 191), on peut être conduit à démontrer l'existence d'un petit nombre de biochronozones. Dans une échelle biochronologique partielle ainsi établie, il n'est pas possible de dénommer la première et la dernière biochronozone: 1°) on ne connaît pas les relations des espèces (ou des couples d'espèces) caractéristiques de la première biochronozone avec les espèces caractéristiques de la biochronozone qui la précède immédiatement (celle-ci reste encore à définir); 2°) de même on ne connaît pas les relations des espèces caractéristiques de la dernière biochronozone avec celles de la biochronozone qui la suit. Dans ces biochronozones «extrêmes» on ne sait donc pas quelles espèces (ou quels couples d'espèces) sont réellement caractéristiques (i.e. limitées à la biochronozone).

VIII) Stratigraphie intégrée et calibration

a) Stratigraphie intégrée

Le terme de *«stratigraphie intégrée»* doit être utilisé uniquement pour décrire l'opération qui consiste à étudier simultanément les relations de distribution entre des taxons qui appartiennent à des groupes fossiles zoologiquement divers (ordres, sous-classes, classes, etc.) dans le but d'utiliser ces relations pour faire des corrélations.

En bref, «stratigraphie intégrée» signifie «élaboration d'une échelle biochronologique établie sur la base de groupes sans relations phylogénétiques».

Pour des raisons pratiques, il est rarement possible de faire de la stratigraphie «intégrée»:

1) Pour aboutir à l'élaboration d'une échelle biochronologique «intégrée» valable, il faut que les différents groupes fossiles utilisés soient tous documentés de manière égale et convenable (effet d'une documentation insuffisante: cf. Guex, 1978a).

2) Le fait que les paléontologistes sont généralement spécialisés n'impose théoriquement pas de limites à la recherche de telles solutions: on

peut toujours intégrer les résultats biostratigraphiques publiés par un auteur sur la distribution d'un groupe donné à ceux obtenus par un autre auteur sur la distribution d'un autre groupe. Deux conditions doivent cependant être satisfaites: 1) les recherches doivent avoir été effectuées dans les mêmes localités et 2) la nomenclature doit être présumée correcte ou être révisée.

Il faut noter encore le fait que l'étude non «intégrée» des relations d'association et d'exclusion de groupes fossiles différents (classe, phylum ou embranchement) va conduire à la mise en évidence de biochronozones dont les limites ne sont pas nécessairement concomitantes. La simple mise en parallèle d'échelles biochronologiques distinctes fondées sur les relations entre des groupes zoologiques différents relève d'un processus de corrélation (au sens usuel) et non pas d'intégration (la confusion entre les deux termes est fréquente).

b) Calibration

Depuis longtemps les paléontologistes travaillant sur des phylums différents raccordent leurs observations biostratigraphiques aux échelles biochronologiques «standard» (cf. p. 188). Par exemple les micropaléontologistes travaillant dans le Mésozoïque relient leurs observations sur la distribution des foraminifères benthiques ou des radiolaires aux subdivisions standard du Mésozoïque établies depuis plus de cent ans en termes de «zones» d'ammonites. Cet aspect de la biostratigraphie est couramment appelé «calibration». Par opposition à la stratigraphie intégrée, la calibration est une «stratigraphie subordonnée».

Les micropaléontologistes qui travaillent sur des groupes peu connus sont parfaitement conscients du fait que leurs descriptions biostratigraphiques sont des descriptions de biofaciès et que leurs résultats ne peuvent pas être utilisés (dans un état de connaissance fragmentaire) pour faire des corrélations temporelles: les corrélations de biofaciès relèvent plus de la lithostratigraphie que de la biochronologie et un biofaciès n'est jamais qualifié de «zone» biochronologique, même s'il s'avère parfois que certains biofaciès sont approximativement «synchrones» sur de vastes étendues.

IX) Biochronozone et Zone Standard

Il est clair qu'un étage peut être subdivisé de manière différente suivant le groupe fossile qu'on utilise pour établir une zonation: par exemple les limites entre des biochronozones fondées sur des trilobites ne vont pas nécessairement coïncider avec celles des biochronozones fondées sur des graptolithes ou sur des céphalopodes, etc.

Pour des raisons pratiques, il est donc utile de considérer séparément les biochronozones basées sur les groupes les plus communément utilisés dans les différentes Eres ou dans les différents Systèmes et de les qualifier de «Zones Standard» (Callomon, 1965).

CALLOMON (*op. cit.* p. 82) définit toutefois cette catégorie de zone de la manière suivante:

> "A Standard Zone is based on a type-section in which specified beds yield characteristic fauna. The base of the lowest bed yielding this fauna is defined as the base of the zone. The top is not explicitely defined..."

Cette définition n'est pas compatible avec celle de la biochronozone:

1°) Dans le cas général, la limite inférieure d'une biochronozone particulière va toujours se situer au-dessous des niveaux qui contiennent son assemblage indiciel (et non pas à la base de ceux-ci).

2°) Une biochronozone n'a de sens que si ses relations avec les biochronozones qui l'encadrent sont clairement établies: le sommet d'une biochronozone doit donc être défini explicitement (cf. Remarque ci-dessous). On redéfinira donc la Zone Standard de la manière suivante:

Toute biochronozone utilisée dans la pratique courante comme subdivision formelle d'un étage est une «Zone Standard». La limite entre deux zones standard doit être enregistrée dans un stratotype qui matérialise localement le contrôle superpositionnel entre les 2 zones. A ce stade de la discussion nous rejoignons complètement CALLOMON & DONOVAN (1974, p. 77) qui ont fort bien exprimé deux conditions que les unités biochronologiques standard doivent satisfaire:

1°) la condition de «contiguïté»: les unités standard ne doivent pas se chevaucher;

2°) la condition des «limites communes»: dans un stratotype, l'intervalle-type de la base de la première zone standard d'un étage définit automatiquement la base de cet étage. Si celui-ci est le premier d'un Système ou d'une Ere, son intervalle-type définit également celui de la base du Système ou de l'Ere. Il est clair que seules les Zones Standard satisfont ces conditions: une biochronozone quelconque (i.e. basée sur un groupe fossile autre que celui qui est utilisé pour la subdivision «standard» de la période concernée) peut fort bien se situer à cheval sur la limite entre deux étages.

Remarque: On peut nous objecter que le fait de définir une zone par sa base uniquement (son sommet étant défini par la base de la zone qui la suit) est logiquement équivalent au fait de définir la limite entre deux zones par un intervalle-type dans un stratotype. Une telle objection serait juste si les auteurs qui proposent cette définition officielle spécifiaient explicitement qu'une zone n'est valide (biochronologiquement) que dans la mesure où ses relations avec les zones qui l'encadrent sont bien établies sur une vaste échelle géographique (ce qu'ils ne font pas clairement). La présente discussion a donc pour but unique de lever une ambiguïté dont les conséquences pratiques sont analysées dans la 2e partie (p. 191).

Comparaison avec la terminologie de l'ISSC

1) Biozone (sensu ISSC)

Ce terme s'applique à n'importe quelle catégorie de concept biostratigraphique, l'«Assemblage-Zone» incluse (cf. point 2 ci-dessous): il peut donc signifier aussi bien «biofaciès» que biochronozone.

2) Assemblage-Zone (sensu ISSC)

La définition originale dit clairement que l'on qualifie d'«Assemblage-Zone» les «corps de strates» qui contiennent un «assemblage naturel»: il s'agit donc d'une «écozone» ou d'un biofaciès.

3) Range-Zone (sensu ISSC)

La définition originale ne signifie pas grand'chose puisqu'elle peut s'appliquer à la distribution biogéographique et biostratigraphique de n'importe quel fossile. On ne s'y attardera donc pas. Il est en revanche nécessaire de préciser les notions de «Taxon-Range-Zone», «Concurrent-Range-Zone» et «Oppel-Zone» couramment utilisées à bon escient. Les «Phylozones» sont discutées séparément.

a) Une Taxon-Range-Zone est un corps de roche ou un biofaciès si l'espèce qui la caractérise est inutile pour faire des corrélations qui sont une approximation de corrélations temporelles. C'est une biochronozone définie par une seule espèce indicielle dans le cas contraire.

b) Une Coucurrent-Range-Zone est un biofaciès ou un corps de roche si les espèces qui la caractérisent sont dépourvues de signification chronologique. C'est une biochronozone dans le cas contraire.

c) L'Oppel-Zone a et aura toujours la prétention d'être significative au plan chronologique: une Oppel-Zone est naturellement une biochronozone. Il vaut la peine de noter ici (à titre d'exemple) que l'ordre de succession des «zones» d'ammonites jurassiques publiées par Oppel en 1856 n'a jamais été contredit par les recherches biostratigraphiques ultérieures. Cependant, depuis cette date mémorable, de nombreuses «zones» nouvelles ont été découvertes et ajoutées au vaste cadre biochronologique (par définition indéfiniment perfectible) tracé par Oppel...

d) Phylozones

On ne discutera pas ici le serpent de mer qu'est la notion d'espèce en Paléontologie. On se contentera de dire qu'une espèce paléontologique peut être définie comme un ensemble de morphotypes qu'on suppose appartenir à une «espèce zoologique» unique. Ces morphotypes sont l'image matérielle de la variabilité de l'espèce présumée, à un moment donné de l'histoire de la Terre.

L'évolution d'une «espèce» particulière peut donc être décrite comme la variation de sa variabilité au cours du temps. Si une «lignée» évolutive

présumée peut être établie dans un profil stratigraphique isolé (discussion: cf. p. 213 et fig. 22), on est en droit de considérer séparément chacun de ses rameaux évolutifs. On n'a en revanche pas le droit de décréter que ces «rameaux» caractérisent des «phylozones» car une «zone» ne mérite ce nom que dans la mesure où elle est utile pour faire des corrélations. Situer, au sein d'une échelle biochronologique, des «rameaux» présumés phylétiques et observés dans une localité isolée constitue, en soi, un problème identique à l'assignation d'intervalles d'existence locaux de morphotypes (ou morphospecies) dont les relations phylétiques sont inconnues à des biochronozones. Le terme de Phylozone est donc superflu.

4) Acme-Zone

L'intervalle stratigraphique local dans lequel une espèce montre un développement «maximum» (i.e. elle est particulièrement fréquente dans certains niveaux) peut être considéré indépendamment de l'extension stratigraphique locale totale de cette espèce. Si l'on peut démontrer qu'un tel intervalle est toujours situé entre d'autres intervalles chronologiquement significatifs, on peut alors estimer qu'il est lui-même significatif au plan temporel. Dans un tel cas il est permis de supposer que cet intervalle correspond à l'ACME de l'espèce en question.

Un exemple simplifié:
Soient A, B et C 3 espèces et I, II,..., **n**, n profils stratigraphiques (fig. 7 a-c). Soit B' un intervalle stratigraphique local dans lequel B est particulièrement abondant. Les relations d'association et d'exclusion entre les espèces A, B et C engendrent 2 associations unitaires (fig. 7-d) mais si l'on tient compte du fait que B montre des maximums locaux de fréquence et que l'on considère ces maximums comme des intervalles particuliers B', on obtient alors 3 associations unitaires caractérisées respectivement par A, B' et C.

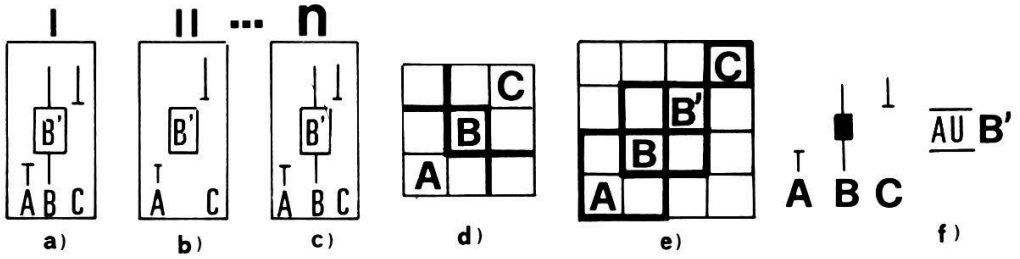


Fig. 7: A, B, C = 3 espèces
B' = maximum de développement local de l'espèce B
I,II,...,n = n profils stratigraphiques
$AU_{B'}$ = biochronozone engendrée par l'acmè de B (= B').

En conclusion, on peut dire que si une association unitaire, caractérisée par le développement maximum d'une espèce, satisfait le principe de reproductibilité, cette association unitaire est une biochronozone définie par l'abondance maximum de cette espèce.

Les travaux de REMANE (1963) sur les Calpionelles sont un excellent exemple de corrélations biochronologiques fondées sur des biochronozones d'acmè. L'acmè de *Calpionella alpina*, caractéristique de la zone du même nom, se situe entre celles des genres *Crassicolaria* et *Tintinopsella:* la zone à *C. alpina* peut donc être comparée à la «zone B'» de notre figure 7-f.

2e PARTIE: INTERVAL-ZONE ET DATUMS

L'«Interval-Zone» est définie par l'ISSC comme l'intervalle qui sépare deux «datums» (=«biohorizons»). La définition du datum proposée par l'ISSC est assez large: en fait, dans la littérature actuelle, ce terme est le plus souvent utilisé dans le sens restreint de «première apparition» et disparition d'une espèce.

Originellement le «datum» prétendait signifier «première apparition phylétique» d'une espèce. Son utilisation impliquait donc que, dans une localité donnée, on avait préalablement démontré que l'apparition d'un taxon X était bien phylétique et non pas fortuite. L'usage du concept de «datum» et d'«Interval-Zone» s'est cependant répandu chez les biostratigraphes qui élaborent des zonations dans le Tertiaire à l'aide des coccolithophoridés, un groupe chez lequel les relations phylétiques entre les différentes «espèces» (morphospecies) ne sont pas connues. Le concept de «datum» a ainsi graduellement perdu sa connotation phylétique pour devenir finalement synonyme de «première apparition locale» et de «disparition locale» d'une «espèce».

Pour illustrer le genre d'erreurs auxquelles peut conduire l'utilisation des concepts discutés ici lorsqu'ils sont «appliqués» à des groupes dont les relations phylétiques sont inconnues, on peut prendre en exemple le problème posé par la zonation du Paléogène à l'aide de critères micropaléontologiques.

En 1959, MALLORY publie une étude très détaillée sur la distribution des foraminifères benthiques du Paléogène de la chaîne côtière (Coast Range) de Californie. Son étude le conduit à diviser le Paléocène et l'Eocène en 5 étages (cf. ci-dessous) et à corréler les principaux profils stratigraphiques paléogènes de Californie à l'aide de l'échelle biochronologique qu'il a établie.

NARIZIEN	Faunizone 4
ULATISIEN	Faunizone 3
PENUTIEN BULITIEN	Faunizone 2
YNEZIEN	Faunizone 1
Mallory 1959	Sullivan 1965

En 1965, SULLIVAN publie à son tour une étude extrêmement minutieuse de la distribution du nannoplancton calcaire dans les mêmes profils stratigraphiques. La synthèse des données biostratigraphiques dont il dispose le conduit à reconnaître 4 biochronozones (qu'il appelle «faunizones») de nannoplancton (cf. GUEX, 1978 b). Les corrélations biochronologiques impliquées par son échelle zonale sont pratiquement identiques à celles que MALLORY a établies à l'aide des foraminifères benthiques.

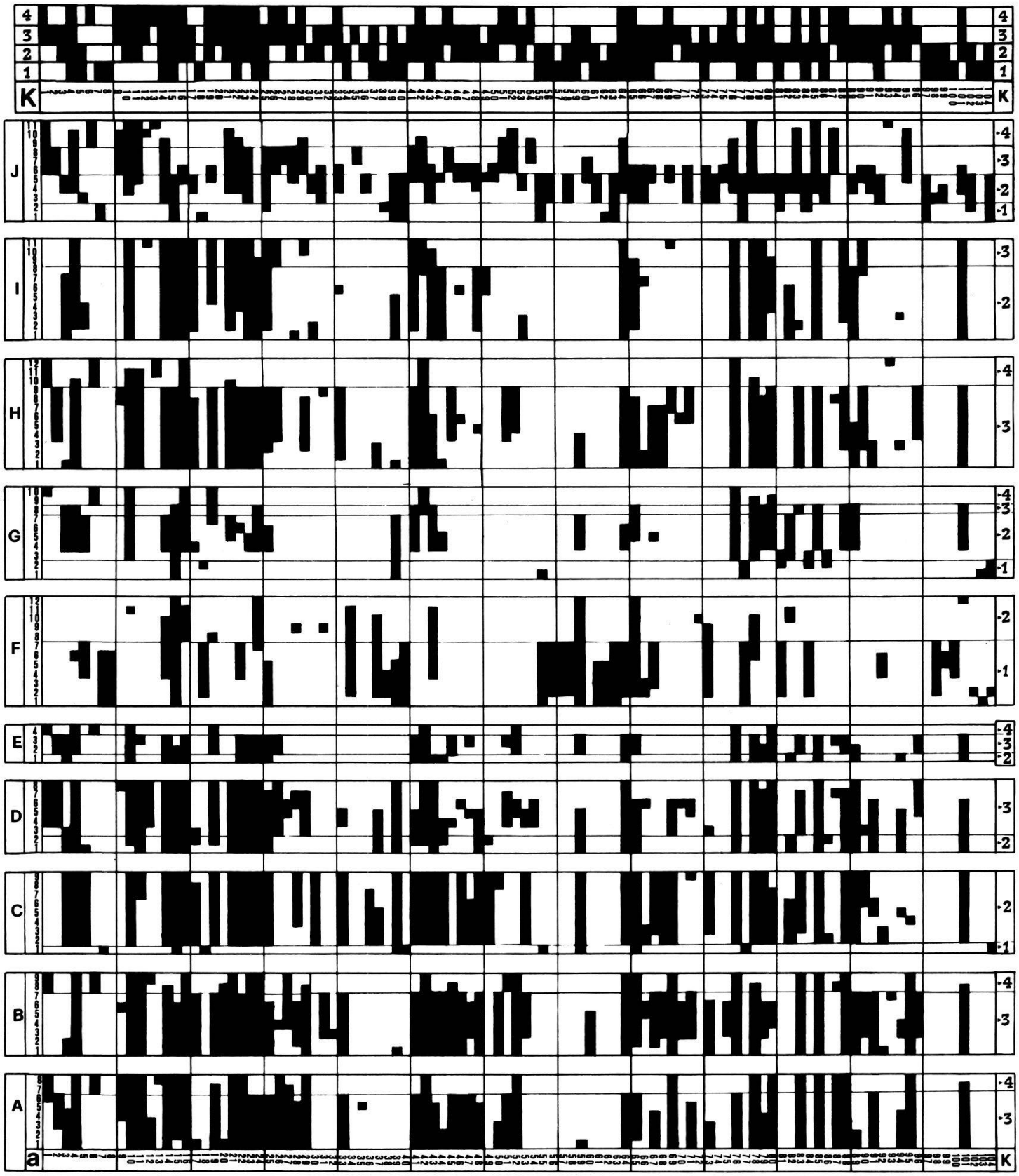
Pour la discussion qui suit il est nécessaire de reproduire ici un tableau synthétique qui montre l'essentiel des données de base utilisées par SULLIVAN (1965) et les limites entre ses biochronozones 1 à 4 dans 10 profils stratigraphiques levés en Californie (profils A à J de la figure 8: correspondance entre les numéros des espèces «1 à 104» et leurs noms: cf. GUEX, 1978 b p. 595).

Depuis 1965, aucun document biostratigraphique nouveau (i.e rééchantillonnage des coupes types) n'a été publié. En revanche les magnifiques travaux de SULLIVAN (1965) et de BRAMLETTE & SULLIVAN (1961) ont été utilisés par tous les nannoplanctonologistes qui ont publié des synthèses ultérieures sur la zonation du Paléogène. Ces données ont été réinterprétées en termes de «datum» et les zones proposées dans les synthèses récentes sont toutes des «Interval-Zones».

Lorsqu'on y regarde de près on constate cependant que lesdites «synthèses» sont toutes en contradiction avec les corrélations classiques de MALLORY (1959) et de SULLIVAN (1965). Voici quelques exemples de définitions récentes d'«Interval-Zones» (BUKRY, 1978):

a) L'intervalle séparant la disparition de *C. grandis* (espèce N° 10 de la figure 8) de la disparition de *D. barbadiensis* (N° 78) est supposé définir une «zone» à *Discoaster barbadiensis* située au-dessus d'une «sous-zone» à *Chiasmolithus gigas* (N° 13) définie par le «range» total de *C. gigas*: si l'on se réfère aux données de base résumées dans le tableau ci-contre (fig 8), on s'aperçoit qu'en réalité l'ordre des disparitions des espèces 10 et 78 est inversé dans 4 localités (i.e.: B=Vaca Valley; F=Simi Valley; G=Tres Pinos et H=Media Aqua Creek) et que l'espèce 78 disparaît avant 13 dans la localité H...

Fig 8: Distribution stratigraphique locale de 104 espèces (1-104) dans 10 profils stratigraphiques (A à J) du Paléogène de Californie. Noms des localités: A = Pacheco; B = Vaca Valley; C = New Idria; D = Upper Canada de Santa Anita; E = Las Cruces; F = Simi Valley; G = Tres Pinos; H = Media Aqua Creek; I = Upper Reliz Creek; J = Lodo.
1 à 104 = espèces de nannoplancton identifiées par SULLIVAN (1965) et par BRAMLETTE & SULLIVAN (1961) pour établir la zonation discutée ici. Correspondance N°/Noms des espèces: cf. GUEX, 1978 b, p. 595.
K = Tableau synthétique montrant la distribution biochronologique des espèces 1 à 104 dans les biochronozones 1 à 4 de SULLIVAN (1965) dont la validité a été confirmée par DAVAUD & GUEX (1978). Discussion: GUEX, 1978 b, p. 591-593.
La corrélation entre les horizons locaux de chaque profil (colonne a) et les biochronozones 1 à 4 est donnée dans la colonne K, située à droite des tableaux de distribution stratigraphique locale (profils A à J) des espèces (1 à 104). →


K
J
I
H
G
F
E
D
C
B
A
a

b) L'intervalle séparant la disparition de *Chiasmolithus gigas* (N° 13) de la disparition de *C. solitus* (N° 11) est censé recouvrir une «sous-zone» à *Coccolithus staurion*: dans la localité H, l'ordre des disparitions est inversé.

c) L'intervalle séparant l'apparition de *D. sublodoensis* (N° 96) de l'apparition de *R. inflata* (N° 54) est censé définir une «sous-zone» à *Discoasteroides kuepperi*: l'ordre des apparitions est inversé dans la coupe D.

On pourrait chercher à expliquer ces contradictions en invoquant des phénomènes de remaniements mais cette objection peut facilement être rejetée: c'est un fait bien connu que l'ordre suivant lequel les espèces (morphospecies) apparaissent (ou disparaissent) dans les différentes coupes stratigraphiques est très variable d'un endroit à l'autre. C'est précisément pour cette raison que HAY (1972; discussion: cf. p. 202), étudiant le problème posé par l'analyse des données de SULLIVAN (1965), a élaboré une technique probabiliste destinée à mettre en évidence des séquences de «datums» qui sont à peu près constantes.

Pour démontrer cette dispersion (bio–) chronologique (= exprimée en termes de biochronozones) dans les moments d'apparition et de disparition locale des différentes espèces, on peut procéder ainsi:

a) partant du tableau des distributions stratigraphiques locales des espèces 1 à 104 (fig. 8), on recense tout d'abord les limites des extensions locales de toutes les espèces dans toutes les localités où elles ont été trouvées, et cela en termes de biochronozones 1 à 4.

Exemple:

Espèces	1		2		3		4		etc.
Localités	App./Disp. dans la biochron.		App./Disp. dans la biochron.		App./Disp. dans la biochron.		App./Disp. dans la biochron.		
A	3	4	3	3	3'	3	3'	5'	
B	4	4	–	–	3'	3	3'	5'	
C	–	–	–	–	2	2'	2	2'	
D	3	3'	3	3'	2'	3	2	3'	
E	4	4	3	3	2'	3	3	4'	
F	–	–	–	–	–	–	1	1	
G	4	4	–	–	2	3	2	3	
H	4	4	3	3	3'	3	3'	4	
I	–	–	–	–	2'	2	2	3'	
J	3	4	3	3	2	2	2	4	

Dans cet inventaire on prend soin de distinguer les premières apparitions locales «fictives» (i.e. tronquées à la base par le fait que la base du profil stratigraphique se situe au-dessus de l'apparition «vraie») des apparitions (+disparitions) locales «vraies» (i.e. enregistrées en-deçà des limites stratigraphiques du profil). Exemple: Dans les profils A, B et H, l'espèce

3 «apparaît» à la base de la biochronozone 3 dont la partie inférieure est évidemment tronquée: on notera donc que l'«apparition» de l'espèce 3 dans ces localités survient dans la biochronozone 3' et on n'en tiendra pas compte dans l'estimation de la dispersion globale des moments d'apparition locaux de cette espèce.

En revanche dans les profils C, G et J, l'espèce 3 apparaît à l'intérieur de la biochronozone 2 (qui n'est pas tronquée dans ces localités puisqu'on la trouve en séquence avec la biochronozone 1): on en déduit que l'espèce 3 apparaît régulièrement dans la biochronozone 2.

b) On considère ensuite la dispersion globale des moments d'apparition et de disparition locaux (toujours en termes de biochronozones 1 à 4). Exemple:

Espèces	1	2	3	4	5	etc.
Apparitions locales	3 à 4	3	2	1 à 3	1 à 2	
Disparitions locales	4	3	2 à 3	1 à 4	1 à 2	

c) On construit ensuite un graphe dont les coordonnées représentent les différentes combinaisons possibles dans la dispersion chronologique des apparitions et des disparitions locales de chaque espèce, en arrangeant ces combinaisons dans un ordre de dispersion croissante (figure 9). Exemple:

- les points qui se trouvent dans la case de coordonnée 1/1 représentent l'ensemble des espèces qui sont régulièrement apparues et disparues dans la biochronozone 1
- les points qui se trouvent dans la case de coordonnée 2-3/2-4 représentent l'ensemble des espèces qui apparaissent tantôt dans la biochronozone 2, tantôt dans la biochronozone 3 et qui disparaissent tantôt dans la biochronozone 2, tantôt dans la biochronozone 4 etc.

d) Les sous-graphes carrés (fig. 9: traits gras) qui se trouvent le long de la diagonale principale contiennent les espèces dont la dispersion des moments d'apparitions locales est identique à la dispersion qu'elles montrent dans leurs disparitions locales. Les sous-graphes rectangulaires situés au-dessus de la diagonale principale contiennent les espèces dont la dispersion des disparitions est plus grande que la dispersion chronologique de leurs apparitions. Les sous-graphes rectangulaires situés au-dessous de la diagonale principale contiennent les espèces qui montrent une plus faible dispersion dans leurs disparitions locales que dans leurs apparitions locales.

Les chiffres 0 à 3 situés en haut et à droite du graphe illustré à la figure 9 indiquent l'amplitude de la dispersion: le sous-graphe carré de coordonnée 0-0 contient l'ensemble des espèces qui montrent une dispersion nulle (i.e. elles apparaissent toujours dans une même biochronozone et disparaissent toujours dans une même biochronozone – qui n'est pas forcément la même que celle dans laquelle elles apparaissent).

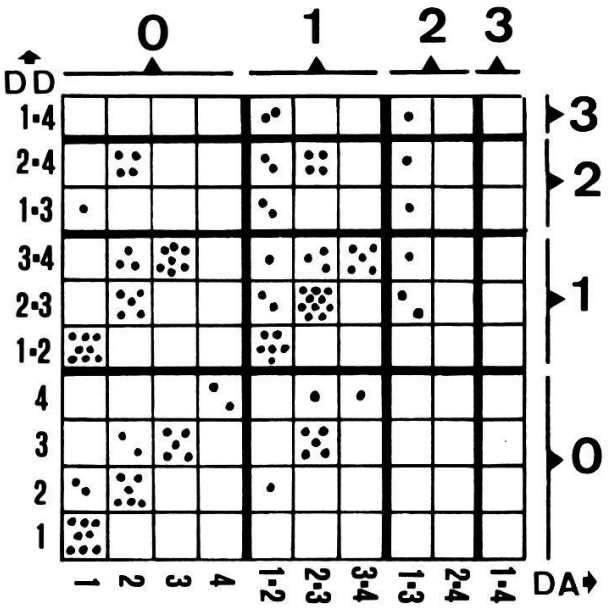


Fig. 9: DA = dispersion dans les «moments» d'apparition locale des espèces 1 à 104 dans les différents profils stratigraphiques A à J, biochronozones 1 à 4: cf. fig. 8).
DD = dispersion dans les «moments» de disparition locale des espèces 1 à 104 dans les profils A à J.
Colonne DA_1: contient toutes les espèces (= points du graphe) qui apparaissent régulièrement dans la biochronozone 1 (amplitude de la dispersion = 0); idem pour DA_2, DA_3 et DA_4.
Ligne DD_1: contient toutes les espèces qui disparaissent régulièrement dans la biochronozone 1 (amplitude de la dispersion = 0); idem pour DD_2, DD_3 et DD_4.
Colonne DA_{1-2}: contient toutes les espèces qui apparaissent tantôt dans la biochronozone 1 tantôt dans la biochronozone 2 (amplitude de la dispersion = 1); idem pour DA_{2-3} et DA_{3-4}.
Ligne DD_{1-2}: contient toutes les espèces qui disparaissent tantôt dans la biochronozone 1, tantôt dans la biochronozone 2 (amplitude dans la dispersion = 1); idem pour DD_{2-3} et DD_{3-4} etc.

Le graphe obtenu (fig. 9) nous apprend que:

- 44% des espèces discutées ici se trouvent dans les sous-graphes carrés: la dispersion (bio–) chronologique de leurs apparitions locales est égale à celle de leurs disparitions locales
- 36% des espèces se trouvent dans les sous-graphes rectangulaires situés au-dessus de la diagonale principale: leur dispersion dans les moments de disparition est plus grande que leur dispersion dans les moments d'apparition
- 10% des espèces se trouvent dans les sous-graphes rectangulaires situés au-dessous de la diagonale principale: leur dispersion dans les moments de disparition est plus petite que leur dispersion dans les moments d'apparition.
- plus de 50% des espèces apparaissent à des «moments» (i.e. en terme de biochronozones = intervalles de temps «relatif») différents suivant les localités.

Cela ne peut évidemment pas être démontré avant que les biochronozones aient été établies: en d'autres termes il n'est pas possible de savoir quels sont les «datums» significatifs au plan chronologique, ni de définir des «Interval-Zones», avant d'avoir établi une séquence de biochronozones valides: la notion même d'Interval-Zone est donc superflue.

Le fait que certaines «Interval-Zones» puissent se trouver tantôt dans une biochronozone, tantôt dans une autre n'a ainsi rien de surprenant: l'intervalle séparant l'apparition de l'espèce *Discolithus versus* (N° 33) de l'apparition de l'espèce *D. ocellatus* (N° 28) est censé caractériser une zone hautement fiable (HAY & STEINMETZ, 1977 p. 1539: probabilité pour que les «datums» de ces deux espèces soient observés en séquence correcte = plus de 87%). Dans les coupes C et J (cf. fig. 8) cet intervalle se situe dans la biochronozone 2 de SULLIVAN alors que dans la coupe D il se trouve dans sa biochronozone 3.

On terminera donc cette discussion des datums et des Interval-Zones par deux remarques:

1) Il est totalement illusoire de chercher à découvrir le «moment» d'apparition phylétique (= «datum» au sens originel du terme) avant d'avoir établi le mieux possible les relations chronologiques entre les morphotypes dont on veut connaître les éventuelles relations phylétiques. Procéder dans l'ordre inverse relève du raisonnement circulaire.

2) La construction d'une échelle de temps dont les unités sont des «Interval-Zones» au sens usuel (i.e. basées sur des «datums» hétérochrones) peut être comparée à la construction d'un château de cartes qui n'aurait qu'un seul pan de mur: de telles constructions ne tiennent pas debout.

3e PARTIE: PROBLÈMES ANNEXES

REMARQUES SUR LES MÉTHODES STATISTIQUES ET PROBABILISTES DE CORRÉLATIONS BIOSTRATIGRAPHIQUES

Il existe une littérature assez abondante sur les approches statistiques des problèmes de corrélations et il est inutile de les passer toutes en revue ici. Ces approches statistiques peuvent être divisées en trois catégories: 1°) les matrices de similarité (dendrogrammes + MDSCAL), 2°) les «régressions» et 3°) les sériations probabilistes. Il suffira de montrer ici que, quelle que soit la technique statistique choisie pour traiter un problème de corrélations (au sens géologique du terme), le résultat chronologique ne pourra jamais être correct.

A) Dendrogrammes et MDSCAL (Multidimensional Scaling)

Le problème posé par les corrélations des roches sédimentaires à l'aide de leur contenu fossile peut être formulé ainsi: étant donné un ensemble d'assemblages fossiles, comment distinguer, au sein de ces assemblages, les taxons dont la présence est contrôlée par des facteurs écologiques de ceux dont la présence est caractéristique de l'âge des niveaux qui les contiennent?

En cherchant une solution statistique à cette question, on se heurte principalement à deux sortes de difficultés:

1) Dans les problèmes biochronologiques que nous avons étudiés, il apparaît que les biochronozones sont aussi souvent caractérisées par des couples indiciels que par des espèces indicielles.

2) La composition globale d'assemblages fossiles subcontemporains est évidemment contrôlée par des facteurs écologiques uniquement. Les variations latérales de la composition de ces assemblages suivent fréquemment celles des faciès sédimentaires. Cette constatation triviale permet souvent de démontrer que, dans un ensemble de niveaux fossilifères consécutifs étudiés dans une localité, la variation de la composition des assemblages fossiles successifs est également contrôlée par des variations écologiques beaucoup plus que par le facteur temps.

Cela veut dire que la similarité (au sens statistique du terme) entre deux assemblages fossiles localement consécutifs est contrôlée d'abord par le facteur écologique et accessoirement par le facteur temps. Cette simple remarque suffirait à démontrer qu'il est inutile de chercher à résoudre le problème posé par la construction d'une échelle biochronologique à l'aide de méthodes statistiques comme l'analyse de groupe ou le «multidimensional scaling».

On donnera néanmoins un exemple imaginaire destiné à illustrer le genre de problème que l'on rencontre lorsqu'on cherche à établir des «sériations» chronologiques d'assemblages fossiles dispersés à l'aide de ces méthodes. Cet exemple caricatural montre ce qui survient dans les dendrogrammes chaque fois que des niveaux fossilifères contiennent plus de taxons présents pour des raisons d'opportunité écologique que de taxons potentiellement caractéristiques au plan temporel. Exemple (fig. 10 et 11):

- R est un tableau montrant les relations d'âge entre 35 espèces (fig. 10 ci-dessous)

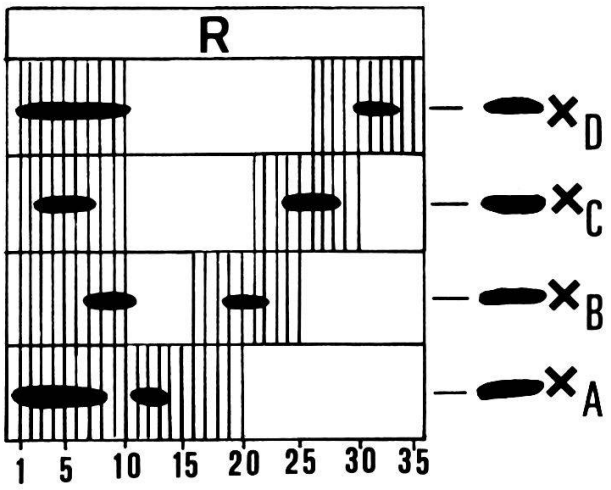


Fig. 10: Tableau montrant les relations d'âge vraies (R) entre 35 espèces (1-35).
X_A à X_D = 4 assemblages fossiles quelconques provenant de 4 localités distinctes dont on ne connaît à priori pas les relations d'âge.

- $X_A \rightarrow X_D$ sont 4 assemblages fossiles découverts dans des localités distinctes.
- A, B, C et D sont les niveaux fossilifères contenant les assemblages $X_A \rightarrow X_D$; ces niveaux sont chronologiquement consécutifs.

Quel que soit le mode de calcul statistique qu'on utilise (dendrogrammes ou MDSCAL), il est impossible d'obtenir une sériation chronologique correcte des niveaux A à D pour les raisons mentionnées plus haut:

La figure 11-a montre un dendrogramme calculé à partir d'une matrice de similarité où les indices sont des coefficients de Jaccard et où les distances sont calculées à l'aide de la formule de Gower ($d_{ij} = \sqrt{2\,(1-s_{ij})}$, où d=distance et s=similarité).

La figure 11-b montre le MDSCAL des niveaux A à D calculé à l'aide d'une formule de Kruskal ($d_{ij} < d_{i'j'} \Leftrightarrow s_{ij} > s_{i'j'}$ où d = distance et s = similarité).

Dans cet exemple les deux modes de calcul donnent le même résultat: les niveaux A et D sont nécessairement groupés car ils contiennent de nombreux taxons communs alors que les niveaux B et C sont éloignés car leur contenu est dissemblable (au sens «similarité» statistique).

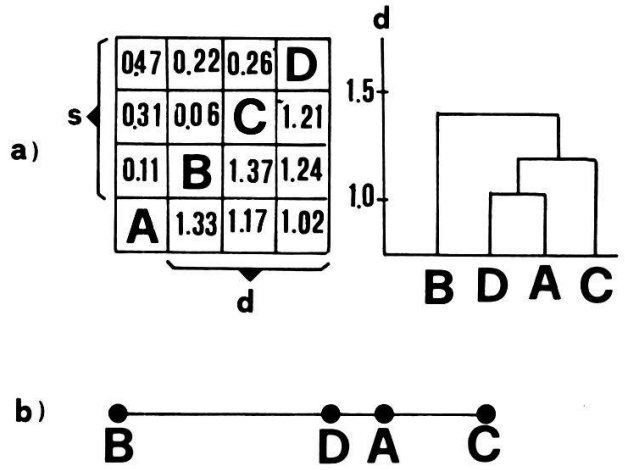


Fig. 11: a) Matrice montrant la similarité (s) et les distances (d) entre les assemblages A à D de la figure 10 et dendrogramme calculé d'après cette matrice.
b) MDSCAL des assemblages A à D calculé d'après les similarités données dans la figure 11-a (s). Détails: cf. texte.

B) Comparaison statistique des relations de distribution stratigraphique locale des espèces dans n *profils (Shaw, 1964).*

L'ouvrage de Shaw (1964) est classique et la méthode de corrélations qu'il a proposée est bien connue. On n'en donnera donc pas de résumé. On se contentera de montrer à l'aide d'un schéma que sa méthode ne permet pas de rendre compte de toutes les relations d'associations observées entre les différentes espèces utilisées pour corréler les profils stratigraphiques.

Dans la figure 12 ci-dessous, x et y sont deux profils stratigraphiques que l'on veut corréler à l'aide des espèces A à E qui leur sont communes. On considère ces profils comme les axes d'un graphe cartésien (x, y) dont les unités sont des mètres (ou des pieds).

Les extensions stratigraphiques locales des espèces communes aux deux profils sont considérées comme des variables. On reporte sur le graphe les points de coordonnées représentant la base et le «top» du «range» local de chaque espèce. Cela donne un ensemble de points («points de corrélation» de SHAW) plus ou moins dispersés.

On calcule ensuite une «ligne» de régression (R). Cette «ligne» peut être utilisée pour projeter sur le profil de référence le «range» des espèces présentes uniquement dans l'autre profil. On obtient ainsi une «Composite Range Chart» (selon SHAW, 1964). Dans l'exemple donné ici (fig. 12) la «ligne» de corrélation (R) est établie à l'aide des «points de corrélation» A_1 à E_2. Le profil x est choisi comme référence et les espèces F et G (présentes dans y uniquement) sont projetées sur x à l'aide de la «ligne» R. Cette projection fait apparaître deux associations qui n'ont pas été observées ($F \cap C$ et $F \cap D$), ce qui est intéressant (l'exclusion apparente de F avec C+D peut être fortuite), mais elle conduit à ignorer l'association $G \cap E$ observée dans y, ce qui est critiquable.

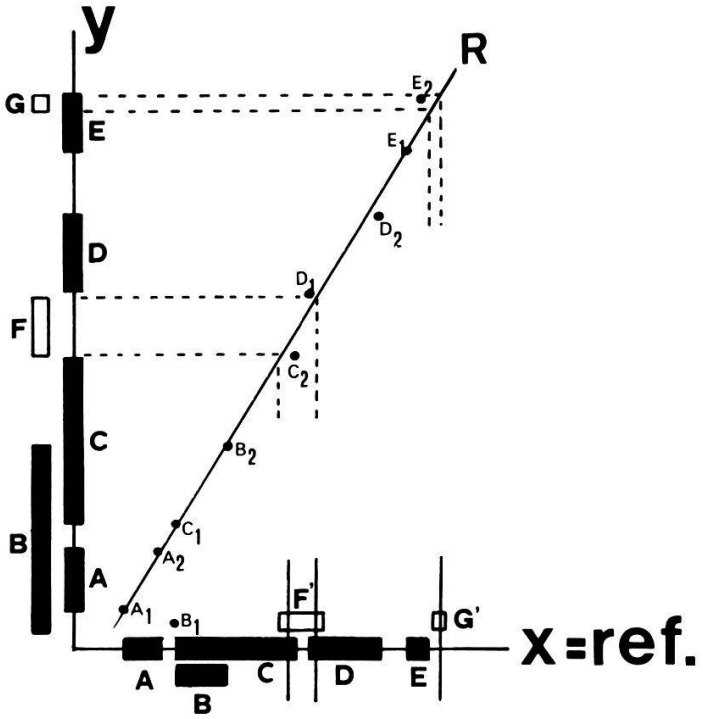


Fig. 12: x et y = 2 profils stratigraphiques.
A à G = 7 espèces
blocs noirs = distribution stratigraphique des espèces A à E dans les profils x et y
blocs blancs = distribution stratigraphique des espèces F et G dans le profil y
F' et G' = projection de la distribution des espèces F et G de y sur le profil x (= référence) à l'aide de la ligne de régression (R)
R = «ligne de régression» tracée sur l'ensemble des points de coordonnée des apparitions et des disparitions des espèces (A_1... E_2).

Notre exemple explique pourquoi le résultat synthétique obtenu par SHAW (1964, p. 350) est incomplet puisque l'association *Meteoraspis metra/Llaonaspis undulata* (observée par PALMER à James River et à Pontotoc, cf. GUEX, 1977) n'apparaît pas dans son «Composite Standard».

SHAW discute en détail les problèmes posés par l'application de sa méthode à la corrélation de séries stratigraphiques où les vitesses de sédimentation sont variables et il n'y a pas lieu de discuter ces questions ici. Il faut néanmoins noter que les «Composite Range Chart» construites à l'aide de cette méthode ne sont pas des échelles biochronologiques s.s. puisque cette technique ne permet pas de rendre un compte exact de toutes les associations observées entre les différentes espèces utilisées pour faire les corrélations.

Il est d'autre part évident que cette méthode n'est pas applicable aux problèmes de corrélations dans lesquels les données de départ sont limitées à des assemblages d'espèces (i.e. dont les «ranges» locaux ne sont pas connus, ce qui est souvent le cas).

Pour terminer ces remarques il est encore nécessaire de mentionner brièvement le fait qu'une modification de la méthode de SHAW a été proposée récemment par HOHN (1978). Dans cette étude, HOHN suit plus ou moins la démarche de SHAW, mais au lieu de calculer des régressions pour construire les «lignes de corrélations» (cf. ci-dessus) il utilise la technique des composantes principales en traitant simultanément l'ensemble des coupes stratigraphiques dans une matrice où les coupes sont considérées comme des variables. A titre d'exemple, HOHN a étudié le même problème que SHAW (i.e. les données publiées par PALMER (1954) sur le Cambrien du Texas: cf. GUEX, 1977) et le résultat qu'il obtient est publié à la page 527 de son article. La distribution verticale relative des espèces est donnée dans un tableau où sont indiquées les positions des «datums» (apparitions et disparitions...) des différentes espèces au sein de la section composite (selon la terminologie de SHAW) calculées à l'aide des composantes principales. Pour tester la qualité du résultat obtenu ainsi, on peut se référer à la distribution stratigraphique locale des 17 espèces les plus fréquentes retenues par SHAW dans sa synthèse (1964, p. 350). Les «ranges» locaux de ces espèces sont illustrés dans GUEX (1977, fig. 1, p. 312, d'après PALMER, 1954). Les relations de distribution de 14 de ces espèces ont été étudiées séparément par SHAW (1964), par GUEX (1977) et par HOHN (1978). La figure 13 ci-dessous montre la distribution relative de ces 14 espèces obtenue par une analyse des composantes principales (d'après HOHN, 1978, p. 527) (relation entre les N^os^ des espèces et leurs noms: cf. GUEX, 1977, p. 322). Cette figure met en évidence le fait que près de 40% des associations observées par PALMER n'apparaissent pas dans le tableau synthétique de HOHN. Cet exemple n'en est qu'un parmi d'autres qui montrent que les problèmes biochronologiques ne peuvent pas être résolus à l'aide de méthodes statistiques.

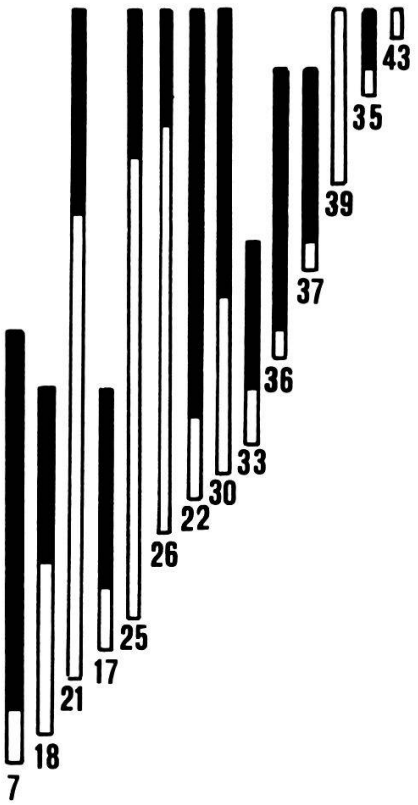


Fig 13: Barres blanches = extensions verticales relatives des espèces 7 à 43 (nomenclature: cf. GUEX, 1977, p. 322) établie à l'aide des composantes principales (HOHN, 1978)
Barres blanches + noires = extensions corrigées en fonction des relations d'association observées entre les différentes espèces (GUEX, 1977).

C) Approche probabiliste (HAY, 1972 et travaux ultérieurs)

Si l'on connaissait l'ordre réel de succession des «événements biostratigraphiques» (= lowest or highest stratigraphical occurrence of a fossil group; HAY, 1972, p. 258), on pourrait sans difficulté construire une échelle biochronologique.

Sur la base de cette constatation, HAY (1972) a proposé une méthode qui devrait permettre de découvrir l'ordre de succession des «événements» (apparitions/disparitions des taxons) le plus probable.

Pour établir de telles séquences, HAY *(op. cit.)* compile dans une matrice l'ensemble des relations séquentielles observées entre tous les événements dans les différents profils stratigraphiques étudiés, i.e. il note, pour chaque événement E, le nombre «n» de fois qu'un événement E_i survient au-dessus ou au-dessous d'un événement E_j dans «N» profils différents. Il compare ainsi successivement chaque événement isolé à tous les autres événements. Les rapports «n/N» observés entre les E_{ij} sont ainsi recensés dans une première matrice. Celle-ci est ensuite réorganisée (permutation lignes/colonnes) de manière que la moitié supérieure de la nouvelle matrice ne contienne que des $n/N \geq ½$. L'arrangement des événements dans la diagonale principale correspondrait ainsi à leur ordre de succession le plus

probable (*op. cit.* p. 263, texte-fig. 4). HAY donne ensuite des formules qui permettent d'établir si, statistiquement parlant, l'ordre de succession obtenu par cette méthode est ou n'est pas le fait du hasard.

Dans des travaux ultérieurs (HAY & STEINMETZ, 1973, 1977; HAY & SOUTHAM, 1975) le mode de calcul de la probabilité pour qu'une séquence d'événements particulière soit correcte a été affiné. L'idée de base reste toutefois la même: si un événement E_i a été observé un «grand nombre» de fois au-dessous d'un événement E_j et très rarement dans l'ordre inverse, le calcul fera apparaître une forte probabilité pour que E_i soit effectivement plus ancien que E_j.

Dans un travail récent, HAY & STEINMETZ (1977) ont réétudié le problème posé par l'interprétation des données de SULLIVAN (1965) et BRAMLETTE & SULLIVAN (1961) (cf. p. du présent travail, texte-fig 8), en termes de probabilités. Cette étude les a conduits à mettre en évidence une séquence de 17 «datums» (*op. cit.* p. 1539) fondée sur des événements dont les relations séquentielles sont fiables (selon les calculs probabilistes) à plus de 87%. HAY & STEINMETZ relèvent eux-mêmes le fait que, dans certaines localités, les ordres d'apparition (ou de disparition) entre les espèces utilisées pour définir les intervalles séparant les «datums» sont inversés (i.e. ces «datums» ne sont pas significatifs dans ces localités).

En réalité il est facile de démontrer pourquoi le fait que les apparitions des différentes espèces surviennent à des «moments» variables (au sens chronologique du terme) dans les différentes localités étudiées (cf. p. 194) implique qu'il est impossible d'obtenir une sériation chronologique des événements («datums» = disp. + app. locales) qui soit utilisable pour faire des corrélations: Soient A, B, C et D des «événements» (1re apparition ou disparition locale des espèces). Soit le signe $<$ = «plus ancien que». Chaque fois qu'une analyse probabiliste des relations entre les 4 événements A à D fera apparaître une solution du type

$$A<D,\ D<B,\ B<C \text{ et } C<A,$$

il sera impossible de découvrir l'ordre de succession «réel» des événements car

$$D<B \text{ et } B<C \Rightarrow D<C, \text{ et } D<C \text{ et } C<A \Rightarrow D<A$$

qui est conflictuel avec $A<D$. Or cette situation est précisément celle que l'on rencontre très généralement lorsqu'on essaye d'établir une séquence d'événements à l'aide de méthodes probabilistes.

REMANIEMENTS, HOMÉOMORPHIES, MIGRATIONS, CONDENSATIONS ET LACUNES

Les auteurs s'accordent généralement sur la définition du terme «remaniement»: un fossile est remanié s'il est extirpé de son dépôt originel pour être inséré dans un dépôt plus récent (remaniement *per ascensum)* ou plus

ancien (remaniement *per descensum* = contamination). Les remaniements de micro-organismes planctoniques sont extrêmement fréquents et parfois difficiles à déceler; c'est pourquoi les micropaléontologistes sont toujours très attentifs à ce problème lorsqu'ils étudient des micro-assemblages pour dater des sédiments. Deux questions nous intéressent ici:

1) Quel va être l'effet d'un remaniement sur la construction d'une échelle biochronologique? La réponse à cette question est triviale: si une espèce est remaniée (*per ascensum* ou *per descensum)*, son «range apparent» va être allongé fallacieusement.

Notons toutefois que les données biostratigraphiques établies dans des séries où les niveaux sédimentaires sont constitués en grande partie par du matériel remanié (sédiments de type flysch) ne sont en général pas prises en considération dans les synthèses biochronologiques effectuées par les micropaléontologistes. De ce point de vue les flyschs posent souvent des problèmes difficiles puisqu'ils ne peuvent être datés que par des approximations fondées sur la présence des taxons présumés les plus récents dans les niveaux turbiditiques successifs.

2) Comment détecter un remaniement si les fossiles que l'on soupçonne d'être remaniés ne montrent pas de trace de transport? La réponse est également triviale: On postule d'abord que, si une espèce montre partout une distribution stratigraphique continue, il est impossible de savoir si ses «fins de ranges» locaux résultent de remaniements ou correspondent bien à la fin de la durée d'existence locale de l'espèce. On va donc chercher, pour toutes les espèces, les discontinuités de distribution qu'elles peuvent éventuellement montrer, en gardant présent à l'esprit le fait qu'une discontinuité de distribution peut être dûe à une homéomorphie ou à une migration et non pas seulement à un remaniement. Exemple (fig. 14 et 15).

Imaginons que R est une échelle biochronologique constituée par 4 biochronozones (I a IV) construite d'après les relations d'association et d'exclusion entre n espèces dans N profils; *alpha* est une espèce ou un assemblage d'espèces.

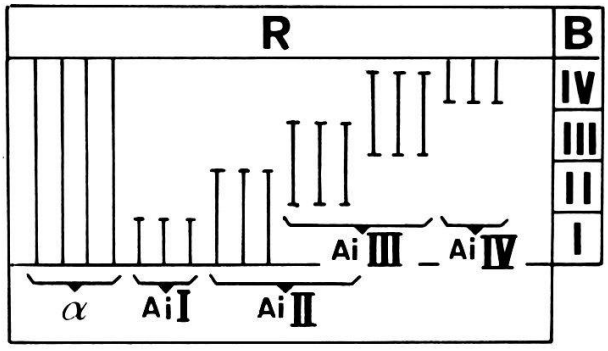


Fig. 14: Tableau montrant les relations d'âge (R) entre 4 assemblages indiciels (Ai_I à Ai_{IV}) caractéristiques de 4 biochronozones I à IV (colonne B). α est une espèce (ou un assemblage d'espèces) que l'on suppose exister dans les biochronozones I à IV (cf. fig. 15).

On commence par corréler les N profils à l'aide des assemblages indiciels ($Ai_I \rightarrow Ai_{IV}$) des biochronozones I à IV. Trois situations peuvent alors se présenter:

1) *Alpha* montre une distribution continue dans tous les profils et on est obligé de conclure qu'elle existe réellement dans les 4 biochronozones (fig. 15a)

2) *Alpha* montre une distribution biochronologique variable d'une localité à l'autre: imaginons que les N profils se trouvent le long d'une transversale Est-Ouest de 1000 km. de long; imaginons également que *alpha* se trouve, à l'Est, dans la biochronozone I, dans les biochronozones II et III des profils intermédiaires et dans la biochronozone IV des profils Ouest: on soupçonnera alors que *alpha* a migré d'Est en Ouest (fig. 15b)

3) *Alpha* est en général cantonné dans la biochronozone I mais dans une ou deux localités on la trouve également dans la biochronozone IV: dans ce cas on pourra soupçonner deux choses (fig 15c):

a) un remaniement de *alpha* dans ces localités: il faudrait alors modifier l'échelle biochronologique en réduisant le «range» de *alpha* à la biochronozone I uniquement;

b) une erreur d'identification due au fait que ce que l'on croyait être *alpha* est en réalité un homéomorphe de *alpha* présent dans la biochronozone IV: dans ce cas-ci il faudra également modifier l'échelle biochronologique B, en y ajoutant le nouveau taxon et en réduisant le «range» de *alpha* (à la biochronozone I également).

Les condensations sont en général identifiables sur le terrain car elles se traduisent souvent par des discontinuités physiques dans la roche (éro-

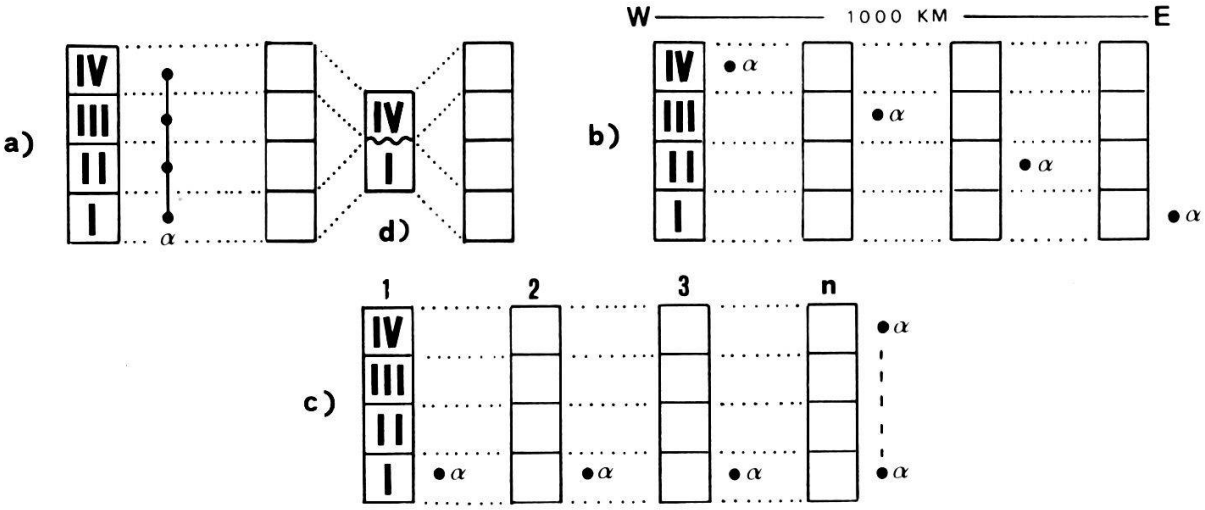


Fig. 15: a) Distribution verticale continue de α dans un ensemble de profils stratigraphiques où les biochronozones I à IV ont été identifiées (cf. fig. 14).
b) Distribution hétérochrone de α dans un ensemble de profils stratigraphiques où les biochronozones I à IV ont été identifiées (migration).
c) Distribution verticale constante de α dans la biochronozone I des profils 1 à 3 et distribution discontinue de α dans le profil n (remaniement).
d) Profil stratigraphique dans lequel les biochronozones I et IV sont identifiées en superposition directe (lacune de II et III).

sions, nodules phosphatés, encroûtements ferrugineux, etc.). Si la nature condensée d'un niveau fossilifère passe inaperçue et que les relations d'association entre les espèces qui s'y trouvent sont intégrées dans la construction d'une échelle biochronologique, le «range» apparent de ces espèces va naturellement être allongé fallacieusement. Pour détecter de telles anomalies on peut raisonner ainsi: si l'on s'aperçoit que dans un «grand nombre» de profils stratigraphiques, 2 (ou n) ensembles d'espèces sont mutuellement exclusifs et homotaxiques, alors que les espèces appartenant à ces ensembles sont trouvées associées dans de rares localités, on pourra soupçonner qu'il existe peut-être des niveaux condensés dans celles-ci. On reconstruira alors le tableau des associations unitaires sans tenir compte des faunes qui proviennent des niveaux condensés présumés. Si les nouvelles associations unitaires qui satisfont le principe de reproductibilité engendrent des corrélations satisfaisantes (du point de vue du bon sens géologique), on en déduira que les niveaux sus-mentionnés sont effectivement «condensés».

Pour terminer on dira encore que la mise en évidence des lacunes dans des séries sédimentaires fossilifères n'est pas toujours aisée. Les échelles biochronologiques sont habituellement établies dans des séries marines d'apparence continue. L'analyse biochronologique de ces séries permet de démontrer l'existence d'un certain nombre de biochronozones. Une fois que ces zones sont établies, il est facile de déceler les profils stratigraphiques dans lesquels des biochronozones normalement «éloignées» (stratigraphiquement) s'observent en superposition directe, alors que les biochronozones qu'elles encadrent ne sont pas identifiables (même sous forme condensée). Dans un tel cas on pourra dire qu'il y a une lacune sédimentaire dont la «durée» correspond à celle des biochronozones absentes localement.

Relation entre longévité des espèces, qualité de l'enregistrement temporel des sédiments et nombre de biochronozones dans lesquelles on peut trouver ces espèces

L'effet de la documentation insuffisante des espèces fossiles (due à la rareté réelle de ces espèces, à un échantillonnage insuffisant ou à un confinement biogéographique) sur la construction des échelles biochronologiques a déjà été discuté par l'auteur (Guex, 1978 a). Dans cette étude nous avons montré: 1°) comment une documentation insuffisante induisait une multiplication du nombre des associations unitaires sans signification chronologique (i.e. ne satisfaisant pas le principe de reproductibilité) et 2°) comment une interprétation directe de ces associations unitaires en termes de «zones» pouvait induire des erreurs de corrélation. Cette question ne sera donc pas discutée plus avant dans le présent travail.

On montrera simplement ici comment il est possible de tester la qualité de l'information biostratigraphique dont on dispose pour construire une

échelle biochronologique. Pour cela on peut se poser la question suivante: quelle relation existe-t-il entre le temps absolu effectivement enregistré par la sédimentation dans les différentes localités fossilifères, la longévité réelle des espèces et le nombre de biochronozones auxquelles ces espèces sont susceptibles d'appartenir? Imaginons que R est un tableau montrant les relations d'âge réelles entre 15 espèces (1 à 15: fig. 16). Les relations d'association et d'exclusion entre ces espèces engendrent 5 biochronozones successives: I à V.

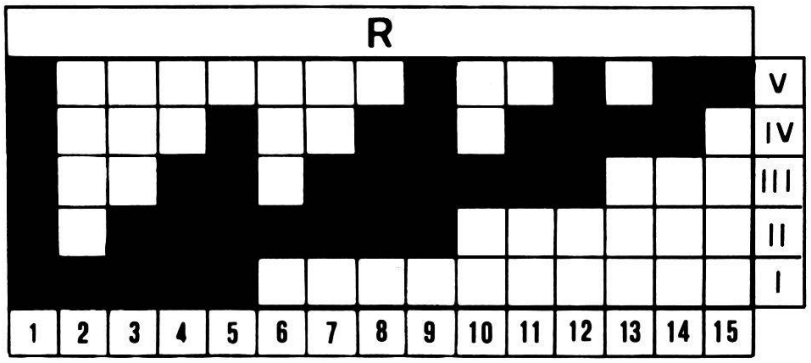


Fig. 16: Tableau montrant les relations d'âge vraies (R) de 15 espèces (1 à 15) dont les relations d'association et d'exclusion engendrent 5 biochronozones (I à V).

Imaginons également que la distribution biogéographique de ces espèces est parfaite, i.e.: on doit obligatoirement les trouver dans tous les dépôts qui se sont formés au cours de leur durée d'existence respective.

Considérons alors 10 profils stratigraphiques A à J et 4 situations sédimentaires différentes:

Situation 1 (fig. 17 a et b):

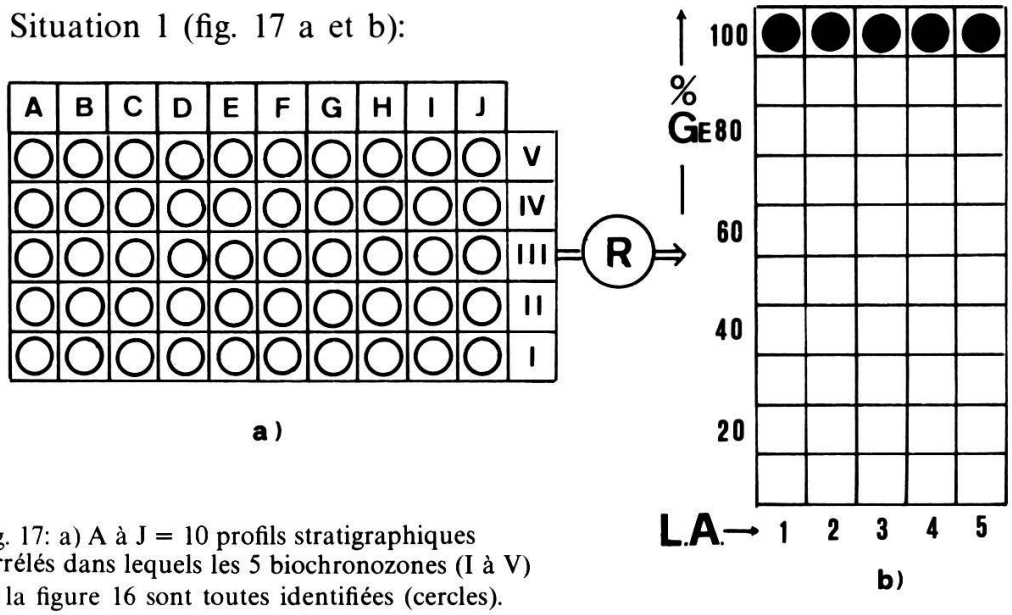


Fig. 17: a) A à J = 10 profils stratigraphiques corrélés dans lequels les 5 biochronozones (I à V) de la figure 16 sont toutes identifiées (cercles).
b) Graphe montrant la relation (gros points noirs) entre la géofréquence des espèces (GE: explication: cf. texte) et leur longévité apparente (LA: exprimée en termes de «nombre de biochronozones» dans lesquelles on trouve chacune d'elles). Ce graphe découle de la combinaison des figures 16 (R) et 17-a. Toutes les espèces se trouvent dans tous les profils: quelle que soit leur durée d'existence, elles ont nécessairement une géofréquence de 100%.

Le spectre de temps global correspondant à la durée d'existence réelle des espèces (fig. 16) est intégralement enregistré dans les sédiments déposés dans les 10 profils stratigraphiques (fig. 17a).

Dans ce cas particulier toutes les espèces vont nécessairement (i.e. par hypothèse) être découvertes dans tous les profils et toutes les biochronozones seront nécessairement identifiables dans ceux-ci. Avant d'illustrer ce fait graphiquement, il est nécessaire de définir deux termes utiles:

a) appelons «géofréquence» le pourcentage de localités dans lesquelles une espèce est découverte par rapport au nombre total de localités étudiées, et

b) «longévité apparente d'une espèce», le nombre de biochronozones auxquelles cette espèce appartient.

On peut construire un graphe qui montre la relation entre ces deux variables et dans la situation 1°) ce graphe prend la forme illustrée dans la figure 17-b

Situation 2 (fig. 18 a, b):

Le spectre de temps correspondant à la durée d'existence réelle des espèces n'est enregistré globalement qu'à 60% dans l'ensemble des profils A à J: la figure 18a montre en effet que la biochronozone I n'est pas enregistrée dans les profils E à J; la biochronozone II n'est pas enregistrée

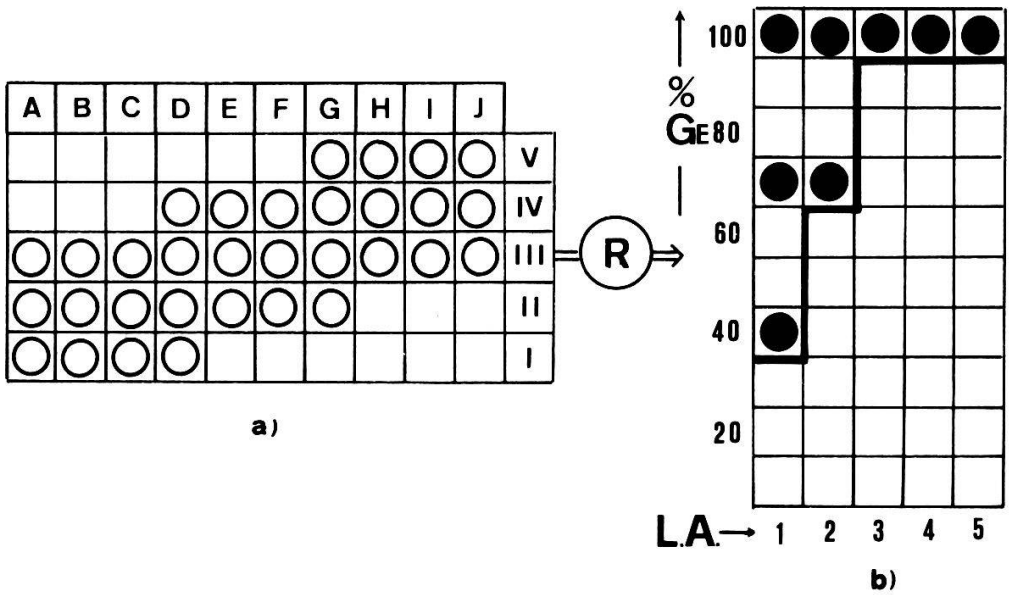


Fig. 18: a) A à J = 10 profils stratigraphiques corrélés: les cercles indiquent le spectre temporel (exprimé en termes de biochronozones I à V: cf. fig. 16) enregistré dans chaque profil (exemple: le profil A ne contient que les biochronozones I à III, B ne contient que I à IV etc.).
b) Graphe montrant la relation (gros points noirs) entre la géofréquence des espèces (GE) et leur longévité apparente (LA). Ce graphe découle de la combinaison entre la figure 16 (R) et la figure 18-a. Le secteur supérieur de ce diagramme («secteur idéal»: cf. texte), limité par un trait gras, souligne le fait que, dans un cas de documentation parfaite, seules les espèces présentes dans 100% des biochronozones peuvent être découvertes dans 100% des localités. Inversement, les espèces dont la durée d'existence est courte, ne peuvent se trouver que dans un nombre restreint de localités (4 au maximum pour les espèces 2 et 15 de la figure 16-R qui n'existent respectivement que dans 1 biochronozone)

dans les profils H à J; la biochronozone IV n'est pas enregistrée dans les profils A à C et la biochronozone V n'est pas enregistrée dans les profils A à F: 20 biochronozones sur un total de 50 (= 5×10) ne sont donc pas enregistrées dans la sédimentation: 60% sont donc bien enregistrées.

La relation entre la géofréquence des espèces et le nombre de biochronozones dans lesquelles on va les trouver est illustrée dans le graphe ci-dessus (fig. 18-b) qui a été construit ainsi:

– les espèces 2, 6, 10, 13 et 15 (n'existant respectivement que dans une biochronozone) doivent nécessairement être découvertes dans 4, 7, 10, 7 et 4 localités respectivement. Par exemple: l'espèce 2 de la zone I de R (fig. 16) doit être trouvée dans les localités A à D (i.e. 40% du nombre total de localités); l'espèce 6 de la zone II de R (fig. 16) doit être trouvée dans les localités A à G (=70%), etc. On remplit donc les cases 40, 70 et 100% de la colonne 1 du graphe.

– les espèces 3, 7, 11 et 14 (existant dans 2 biochronozones) doivent respectivement être découvertes dans 7, 10, 10 et 7 localités: on remplit donc les cases 70 et 100% de la colonne 2 du graphe.

– les espèces dont la durée d'existence recouvre 3, 4 ou 5 biochronozones (i.e.: 1, 4, 5, 8, 9, 12) vont nécessairement être découvertes dans toutes les localités: on remplit donc la case 100% des colonnes 3, 4 et 5.

Le secteur du graphe dans lequel se trouvent tous les points correspondant aux espèces 1 à 15 (fig 16: «R») dans les profils A à J de la situation 2° (fig. 18) sera appelé «secteur idéal»: ce secteur est limité par un trait gras dans la figure 18-b.

Situations 3 et 4 (fig. 19 et 20):

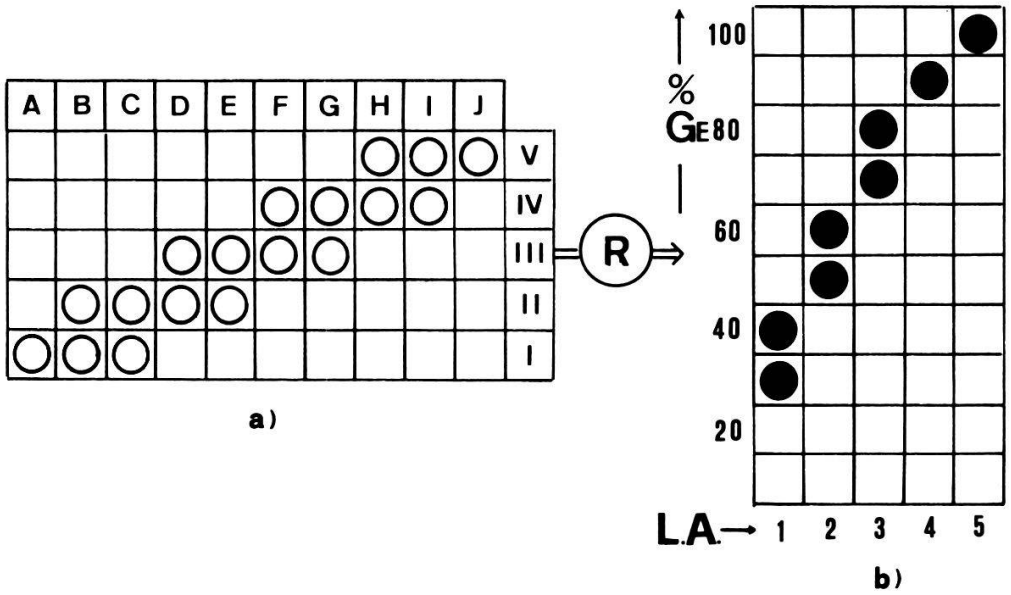


Fig. 19: a) A à J = 10 profils stratigraphiques dans lesquels l'intervalle de temps recouvrant les biochronozones I à V de la figure 16 n'est que partiellement enregistré (cercles).
b) Relation entre la géofréquence (GE) et la longévité apparente (LA) des espèces, établie d'après les figures 16-R et 19-a.

Dans l'ensemble des profils A à J, le spectre de temps correspondant à la durée d'existence des espèces 1 à 15 (fig. 16) n'est enregistré globalement qu'à 36% dans la situation 3° (fig. 19-a) et à 20% dans la situation 4° (fig. 20-a). Les figures 19-b et 20-b montrent la relation entre la géofréquence et la longévité des espèces dans ces 2 situations.

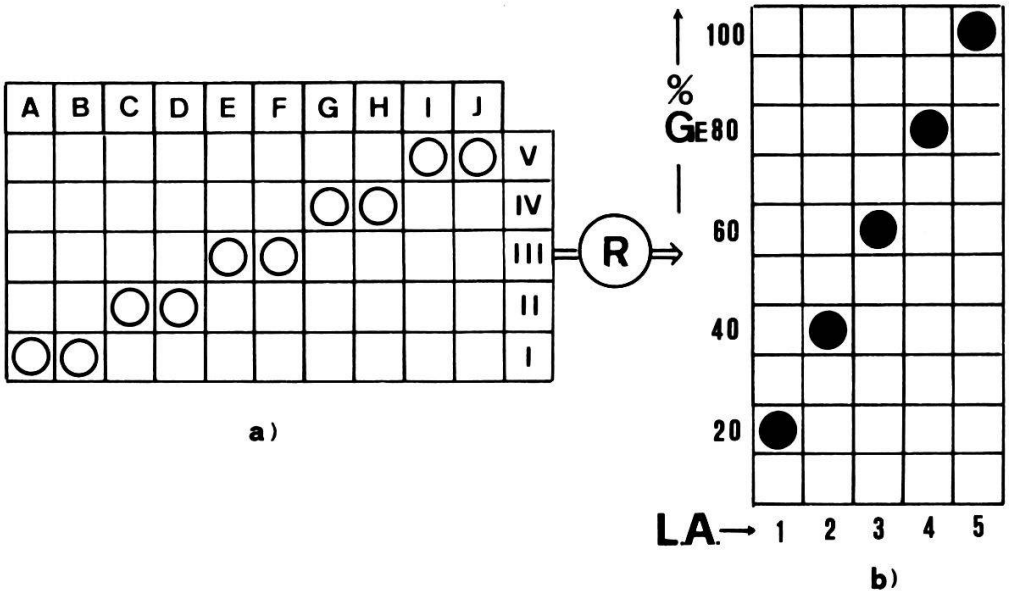


Fig. 20: a) A à J = 10 profils stratigraphiques dans lesquels l'intervalle de temps recouvrant les biochronozones I à V de la figure 16 n'est que très partiellement enregistré (cercles).
b) Relation entre la géofréquence (GE) et la longévité apparente (LA) des espèces, établie d'après les figures 16-R et 20-a.

Cet exemple est destiné à illustrer deux évidences: 1) seules les espèces présentes dans 100% des localités fossilifères peuvent être présentes dans 100% des unités biochronologiques; 2) inversement les espèces dont la durée d'existence est courte ne peuvent se trouver que dans un nombre restreint de localités car il est clair que le spectre de temps absolu enregistré par les sédiments, dans une localité isolée, est très fragmentaire: même si un profil stratigraphique montre une séquence sédimentaire parfaitement continue, l'intervalle de temps enregistré dans une telle séquence est obligatoirement limité par la dimension de l'affleurement. On peut appliquer cette analyse graphique à l'exemple des biochronozones de nannoplancton du Paléogène de Californie (biochronozones 1 à 4 de Sullivan (1965): La figure 21-a montre l'intervalle biochronologique (biochronozones 1 à 4) enregistré dans les différentes localités (C. F,..., B) et la figure 21-b montre la relation entre la géofréquence globale des espèces et le nombre de biochronozones dans lesquelles on les trouve (i.e. leur longévité apparente).

Ces graphes peuvent être comparés aux figures 18-a et b (ci-dessus) qui montrent ce qui se passerait dans la situation idéale (N° 2) où environ 60% du spectre temporel global est enregistré par les sédiments et où la distri-

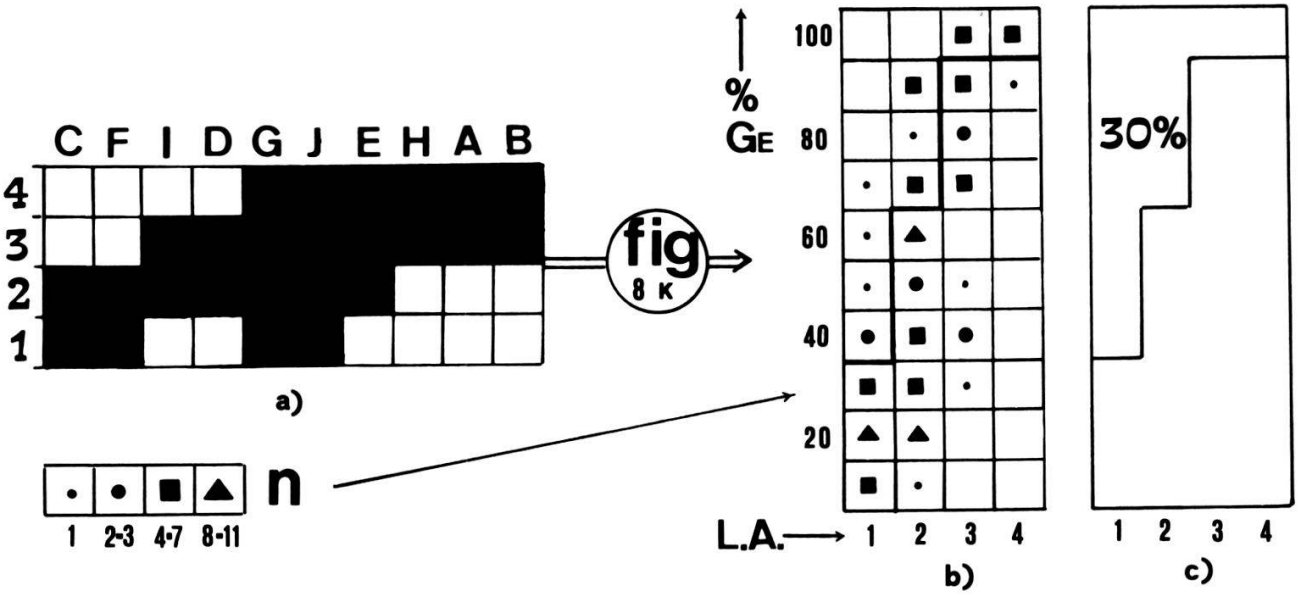


Fig. 21: a) Tableau montrant l'intervalle biochronologique (exprimé en termes de biochronozones 1 à 4) enregistré dans les différents profils stratigraphiques (A à J) du Paléogène de Californie (construit d'après la figure 8, p. 000).
b) Graphe montrant la relation entre la géofréquence des différentes espèces (i.e. pourcentage de localités dans lesquelles ces espèces ont été trouvées) et le nombre de biochronozones dans lesquelles ces espèces existent (L.A. = longévité apparente).
Les symboles «n» indiquent le nombre de points (correspondant à chacune des espèces) qui se trouvent dans chacune des cases de coordonnée du graphe.
Ce diagramme découle de la combinaison entre le tableau des relations d'âge entre les 104 espèces de la figure 8-K et l'intervalle de temps relatif enregistré dans chacun des profils stratigraphiques (fig. 21-a).
c) Diagramme soulignant le fait que 30% des espèces de nannoplancton qui ont permis de construire l'échelle biochronologique de Paléogène de Californie (SULLIVAN, 1965) sont apparemment documentées de manière «idéale»

bution biogéographique des espèces recouvre la totalité de la surface occupée par les profils stratigraphiques étudiés. Pour cela, transposons un «secteur idéal» analogue à celui de la figure 18-b dans le graphe illustré à la figure 21-b. On obtient ainsi la figure 21-c. Environ 30% du nombre total des espèces utilisées pour construire l'échelle biochronologique (plus précisément 32 sur 104) à partir des données de base (fig. 8, p.193) se trouvent dans ce «secteur idéal». Dans ce 30%, on trouve naturellement toutes les espèces indicielles des biochronozones 1 à 4 de SULLIVAN...

Cette analyse ne constitue pas, en soi, une démonstration absolue du fait que les biochronozones de SULLIVAN sont caractérisées par des espèces documentées de manière idéale (aussi bien au plan de leur durée d'existence restreinte que de leur vaste distribution biogéographique) mais elle permet en tous les cas de supposer que ces 4 biochronozones impliquent des corrélations qui sont une excellente approximation de corrélation temporelle. Le fait que les «corrélations nannoplancton» de SULLIVAN (1965) coïncident avec les «corrélations benthiques» de MALLORY (1959) parle également en faveur de la justesse de cette supposition (cf. p.192).

Hiérarchie des démarches analytiques

Enoncer l'ordre suivi dans les démarches analytiques qui président à l'utilisation des fossiles dans la construction d'une échelle de temps relative et dans les corrélations est banal. On le fera malgré tout car cet ordre n'est pas systématiquement respecté par les biostratigraphes et il en découle de nombreuses erreurs.

1) Collection in situ

Il est inutile de rappeler que les fossiles doivent être récoltés en place et situés dans des profils stratigraphiques précis et soigneusement mesurés.

2) Identification

On a comparé ailleurs (Guex, 1977) l'identification du fossile à une mesure du temps relatif (=biochronologique). En première analyse, cette identification doit être purement typologique. Lorsqu'on commence l'étude paléontologique d'un groupe, on ne connaît en effet pas les relations phylogénétiques entre les espèces que l'on a récoltées: on doit donc se contenter de déterminer d'abord les fossiles au niveau spécifique et générique en faisant en sorte que les identifications soient les plus proches possibles des holotypes des morphospecies.

3) Construction des associations unitaires

Si l'on dispose d'un matériel abondant, bien identifié, et que la littérature donne des indications précises et nombreuses sur la distribution stratigraphique des groupes étudiés dans diverses parties du monde, on peut espérer utiliser ces groupes pour faire des corrélations: on commence alors par établir les associations unitaires engendrées par les relations entre toutes les espèces.

4) Recherche des biochronozones

On cherche ensuite si certaines de ces associations unitaires correspondent à des biochronozones. Si c'est le cas, on peut alors utiliser celles-ci pour corréler les différentes localités fossilifères: on établit ainsi une image la plus correcte possible (dans un état de connaissance donné) des relations d'âge entre les espèces et les genres qui ont été identifiés (ou révisés): on peut alors commencer à étudier les relations phylogénétiques entre les groupes étudiés.

5) Catégories taxonomiques supérieures

Une fois que des relations phylogénétiques satisfaisantes ont été établies, il est alors possible de grouper les genres et les espèces en catégories taxonomiques supérieures.

On a dit plus haut que l'ordre des démarches analytiques énoncé ici n'était pas toujours respecté par les paléontologistes. On constate en effet que certains auteurs estiment avoir démontré des séquences évolutives en décrivant simplement des variations verticales locales de la variabilité des «espèces» (= ensembles de morphotypes: cf. p. 189).

Prenons l'exemple imaginaire suivant (fig. 22): Admettons que l'on peut

démontrer, dans un profil stratigraphique isolé (ou dans un ensemble de profils géographiquement voisins), que la composition d'une succession d'assemblages de morphotypes appartenant présumablement à une espèce unique varie de manière régulière au cours du temps.

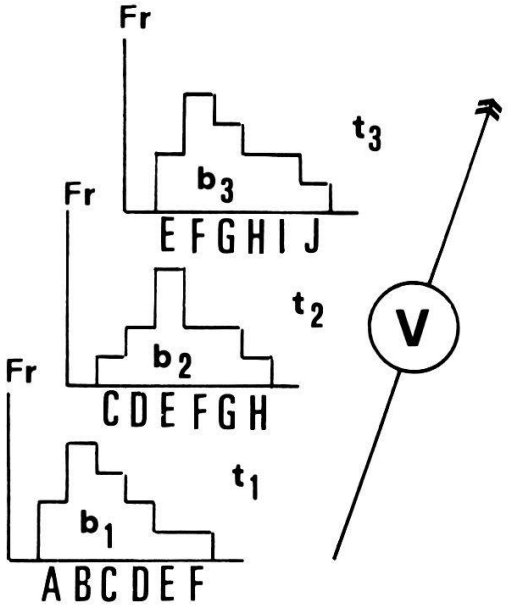


Fig. 22: Variation (V) de la variabilité «instantanée» de 3 biospecies (b_1 à b_3) à 3 moments (t_1 à t_3) de leur histoire. Cette variabilité est exprimée en termes de fréquence (Fr) des différents morphotypes (A-F; C-H; E-I) appartenant aux espèces b_1 à b_3. Chaque espèce successive conserve un certain nombre de morphotypes ancestraux (p. ex. b_2 conserve C, D, E et F de b_1).

Une telle démonstration n'implique pas que l'on a mis en évidence l'existence d'une séquence évolutive (=irréversible) au sein du groupe étudié. La variation régulière de la variabilité de ce groupe (observée localement) peut fort bien traduire une adaptation morphologique du groupe à des conditions écologiques locales particulières: rien ne prouve que ces variations sont irréversibles. Dans un tel cas il est clair que les durées d'existence locales et limitées des différents morphotypes ne vont pas engendrer des biochronozones puisque ces morphotypes ont une distribution biogéographique limitée. Inversement, les variations morphologiques qui s'observent au sein d'un groupe sur de vastes étendues géographiques se traduisent par le fait que certains morphotypes montrent une durée d'existence réellement limitée (si on la compare à celles des autres). C'est l'analyse biochronologique, telle qu'elle est conçue ici, qui va permettre de découvrir les durées d'existence «courtes» (et limitées par une évolution irréversible) de ces «morphospecies» car ce sont elles, précisément, qui vont être génératrices de biochronozones.

Cela veut dire que des biochronozones bien établies (i.e. jamais contredites par l'augmentation du volume de la documentation paléontologique) ne se contentent pas de satisfaire le principe de reproductibilité: leur signification temporelle est aussi directement liée à l'irréversibilité de l'évolution.

APPENDICES

I) Remarques sur une publication de RUBEL (1976)

Nous avons pris récemment connaissance d'une publication de RUBEL (1976) intitulée «On biological construction of time in Geology». Dans ce travail, RUBEL (*op. cit.* p. 139) montre comment des relations de distribution stratigraphique entre des espèces, établies dans une localité donnée, peuvent être compilées dans une matrice qui exprime ces relations en termes de *«associé», «au-dessous de»* et *«au-dessus de»:* le point de départ de son étude est donc comparable à ceux de HAY (1972; discussion cf. p. 202 du présent travail) et de GUEX (1977). La démarche suivie par RUBEL diffère cependant de celle de l'auteur par les points suivants: a) RUBEL n'analyse pas le problème posé par l'interprétation d'une telle matrice lorsque celle-ci contient des informations biostratigraphiques provenant de localités dispersées (= problème d'analyse combinatoire). Cela conduit HAY & SOUTHAM (1978) à dire que «Rubel's technique does'nt allow for the possibility of conflicting ranges in different sections...» b) Il limite son analyse à l'utilisation des intervalles qui séparent des taxons mutuellement exclusifs pour faire des corrélations. Cela le conduit à discuter en détail le problème posé par les intervalles de séparation (qu'il appelle «moments») qui se chevauchent (*op. cit.* p. 141, 142), problème qu'il aurait évité s'il avait introduit la notion d'associations unitaires (ce qu'il ne fait pas). Il n'en reste pas moins que l'approche logique de RUBEL (1976) est plus voisine de celle de GUEX (1977) que ne le sont toutes les autres techniques analytiques proposées dans la littérature récente.

II) Corrigenda

Dans le travail publié par GUEX (1978 b), deux fautes dues à une inattention de l'auteur doivent être corrigées: 1) Dans la compilation des relations d'association et d'exclusion entre les espèces de nannoplancton du Paléogène californien décrites par SULLIVAN (1965), effectuée d'après les données biostratigraphiques locales illustrées dans la planche hors texte du travail sus-mentionné, l'association entre les espèces 26 et 6 (observée dans la localité A) a été omise. Cette omission apparaît dans la matrice des spectres d'association (*op. cit*, fig. 4, p. 589); elle impliquerait que l'espèce 26 est un équivalent permutatoire de l'espèce 2 ce qui est faux (26 est équivalente à 29): cette erreur se répercute dans la figure 3-a (= matrice réduite, *op. cit.* p. 585) dont la permutation donne un tableau des associations unitaires (fig. 3-d, p. 585) qui est en contradiction avec la «Range-Chart» simplifiée illustrée dans la figure 2 (*op. cit.* p. 584), dessinée directement d'après le tableau des données de base (Planche hors texte). Dans ces figures il est donc nécessaire de faire les corrections suivantes:

a) Fig. 2 (p. 584): remplacer la distribution verticale locale de l'espèce 26 par celle de l'espèce 2 (en se référant à la planche hors texte).
b) Fig. 3 (p. 585): remplacer partout l'espèce 26 par l'espèce 2.
c) Fig. 4: noter que 26 et 6 sont associés et que 26 est équivalent à 29.
d) p. 586: remplacer 26 par 2 dans le texte.
e) p. 590: noter que 26 est équivalent à 29...

Cette regrettable erreur n'entraîne pas de contradictions dans la solution du problème étudié (planche hors texte fig. K), mis à part le fait que l'extension de 26 doit être étendue à l'intervalle V. D'autre part l'auteur est responsable du fait qu'une faute typographique est restée incorrigée à la page 597 du même travail où il faut lire:
Localité D: Horizons 1-2 = Intervalle II et Horizon 3 = Intervalle III; Localité G: Horizon 8 = Intervalle III; Localité H: Horizons 1-8 = Intervalle III; Localité I: Horizons 1-8 = Intervalle II.

Remerciements

Les professeurs J. H. Callomon, H. Masson, H. S. Torrens et R. Trümpy ont bien voulu lire ce travail et me faire part de leurs commentaires critiques: qu'ils trouvent ici l'expression de mes cordiaux remerciements.

Bibliographie

Arkell, W. J. 1956. – Jurassic Geology of the world. Oliver & Boyd, London.

Berry, W. B. N. 1966. – Zones and zones – with exemplifications from the Ordovician. *Amer. Assoc. Petrol. Geol. Bull. 50/7.*

Bramlette, M. N. & Sullivan, , F. R. 1961. – Coccolithophorids and related nannoplankton of the early Tertiary in California. *Micropaleontology 7/2.*

Bukry, D. 1978. – Biostratigraphy of Cenozoic marine sediment by calcareous nannofossils. *Micropaleontology 24/1.*

Callomon, J. H. 1965. – Notes on Jurassic stratigraphical nomenclature. *Carpatho-Balkan Geol. Assoc.,* VII *Congr., Sofia, Rep.* II, 1.

– & Donovan, D. T. 1971. – A code of Mesozoic stratigraphical nomenclature. *Colloque Jurassique Luxembourg,* 1967. *Mem.* B.R.G.M. *75.*

Davaud, E. 1978. – Un algorithme facilitant l'élaboration d'échelles biochronologiques fondées sur un grand nombre d'espèces. *Ecl. Geol. Helv. 71/3.* (*in* Davaud & Guex, 1978).

– & Guex, J. 1978. – Traitement analytique «manuel» et algorithmique de problèmes complexes de corrélations biochronologiques. *Ecl. Geol. Helv. 71/3.*

Donovan, D. T. 1966. – Stratigraphy, an introduction to principles. Murby, London.

Gabilly, J. 1971. – Méthodes et modèles en stratigraphie du Jurassique. *Colloque Jurassique Luxembourg,* 1967. *Mem.* B.R.G.M. *75.*

GUEX, J. 1977. – Une nouvelle méthode d'analyse biochronologique. Note préliminaire. *Bull. Soc. vaud. Sc. nat.* 351, *73* et *Bull. Lab. Géol., Min., Géoph. et Musée Univ. Lausanne 224.*

– 1978 a. – Influence du confinement géographique des espèces fossiles sur l'élaboration d'échelles biochronologiques et sur les corrélations. *Bull. Soc. vaud. Sc. nat. 74/2* et *Bull. Labl. Géol., Min. Géoph. et Musée Univ. Lausanne 230.*

– 1978 b. – La zonation du Paléocène supérieur et de l'Eocène inférieur et moyen de Californie à l'aide du nannoplancton. *Ecl. Géol. Helv. 71/3* (*in* DAVAUD & GUEX, 1978).

HANCOCK, J. M. 1977. – The Historic Development of Biostratigraphic Correlation (*in* KAUFFMAN & HAZEL, 1977).

HAY, W. W. 1972. – Probabilistic stratigraphy. *Ecl. Geol. Helv. 65/2.*

– & STEINMETZ, J. C. 1973. – Probabilistic analysis of distribution of Late Paleocene-Early Eocene calcareous nannofossils. *Gulf Coast Sect., Soc. Econ. Mineral. Paleont., Proc. Symp. Calcareous Nannofossils.*

– & – 1977. – High reliability and usefulness in probabilistic stratigraphic analysis. *Mem. Segundo Congr. Latino Amer. Geol. Caracas.*

– & SOUTHAM, J. R. 1978. – Quantifying biostratigraphic correlation. *Ann. Rev. Earth Planet. Sc. 6.*

HOHN, M. E. 1978. – Stratigraphic correlation by principal components: effect of missing data. *Journ. Geol. 86.*

HOLLAND, C. H. 1978. – Stratigraphical classification and all that. *Lethaia 11.*

– & *al.* 1978. – A guide to stratigraphical procedure. *Geol. Soc. London, Spec. Rep. 11.*

I.S.S.C. 1976. – A Guide to Stratigraphic Classification. Terminology and Procedure. Wiley & Sons, New York.

JELETZKY, J. A. 1956. – Paleontology, basis of practical geochronology. *Amer Assoc. Petrol. Geol. Bull. 40/4.*

– 1978. – Causes of cretaceous oscillations of sea level in western and arctic Canada and some general geotectonic implications. *Geol. Surv. Canada, Paper 77/18.*

KAUFFMAN, E. G. & HAZEL, J. E. 1977. – Concepts and Methods of Biostratigraphy. Dowden, Hutchinson & Ross, Inc., Stroudsburg.

KLEINPELL, R. M. 1938. – Miocene stratigraphy of California. *Amer. Assoc. Petrol. Geol., Tulsa.*

MALLORY, V. S. 1959. – Lower Tertiary biostratigraphy of the California Coast Ranges. *Amer. Assoc. Petrol. Geol., Tulsa.*

MILLER, T. G. 1965. – Time in stratigraphy. *Paleontology 8/1.*

OPPEL, A. 1856-1858. – Die Juraformation. Ebner & Seubert, Stuttgart.

PALMER, A. R. 1954. – The faunas of the Riley Formation in central Texas. *Journ. Pal. 28/6.*

REMANE, J. 1963. – Les Calpionelles dans les couches de passage Jurassique-Crétacé de la Fosse Vocontienne. *Trav. Lab. Géol. Fac. Sc. Grenoble 39.*

RUBEL, M. 1976. – On biological construction of time in geology. *Eesti NSV Tead. Akad. Toim. Keem. Geol. 25.*

SCHINDEWOLF, O. H. 1950. – Grundlagen und Methoden der paläontologischen Chronologie. Borntraeger, Berlin.

– 1970. – Stratigraphie und Stratotypen. *Akad Wiss. Lit. Mainz, Math. – Naturwiss. Kl., Abh. 2.*

SHAW, A. B. 1964. – Time in stratigraphy. McGraw-Hill, New York.

SULLIVAN, F. R. 1965. – Lower Tertiary Nannoplankton from the California Coast Ranges. II. Eocene. *Univ. Calif. Publ. geol. Sci. 53.*

TEMPLE, J. T. 1978. – Comment on stratigraphical classification and all that. *Lethaia 11.*

TOZER, E. T. 1967. – A Standard for Triassic Time. *Geol. Surv. Canada Bull. 156.*

– 1971. – Triassic time and ammonoids: problems and proposals. *Canad. Journ. Earth. Sci. 8/8.*

Manuscrit reçu le 28 février 1979